

# Leitfaden zum Enhanced Landfill Mining



Gefördert vom



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

**Porta Westfalica**  
**Mai 2016**

Unterstützt vom

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,  
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen



Das diesem Leitfaden zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 033R090A, 033R090B, 033R090C, 033R090D, 033R090E und 033R090F gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Alle Rechte, insbesondere das Recht zum Druck des Leitfadens und Verbreitung sowie der Übersetzung, bleibt den Autoren vorbehalten. Die Genehmigung zur elektronischen Verbreitung kann schriftlich beim Konsortialführer angefragt und genehmigt werden.

## **Autoren:**

- Dr. Michael Krüger  
(Karl Tönsmeier Entsorgungswirtschaft GmbH & Co. KG)
- Dipl.-Ing. Bernd Becker  
(Abfallentsorgungsbetrieb des Kreises Minden-Lübbecke)
- Prof. Dr.-Ing. Klaus Fricke, Dr.-Ing. Kai Münnich,  
Dipl.-Ing. Sebastian Wanka, M.Sc. Anton Zeiner  
(Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig )
- Prof. Dr. Thomas S. Spengler, Dr. Karsten Kieckhäfer,  
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Anna Breitenstein  
(Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion, TU Braunschweig)
- Prof. Dr.-Ing. Norbert Dichtl, Dipl.-Ing. Karsten Fülling  
(Institut für Siedlungswasserwirtschaft, TU Braunschweig )
- Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz, Dipl.-Ing. Anja Maul  
(Institut für Aufbereitung und Recycling (I.A.R.), RWTH Aachen University)
- Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker, Dipl.-Ing. Martin Rotheut  
(Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe (TEER),  
RWTH Aachen University)
- Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann, Dipl.-Ing. Boris Breitenstein  
(Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik, TU Clausthal)
- Dipl.-Geograph Florian Knappe, Dipl. Geoökologe Joachim Reinhardt,  
Dipl.-Geoökologin Stefanie Markwardt, Dipl.-Mineralogin Stefanie Theis,  
Dr. Monika Dittrich  
(Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH)
- Dipl.-Ing. Günter Dehoust  
(Öko-Institut e.V.)



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>8</b>
<b>Vorwort</b>	<b>9</b>
<b>Zusammenfassung (Management Summary)</b>	<b>11</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>15</b>
1.1. Ausgangslage und Problemstellung	15
1.2. Begriffsbestimmungen im Rahmen des Deponierückbaus	15
1.3. Zielsetzung und Vorgehensweise	17
<b>2. Vorbereitende Arbeiten zum Deponierückbau</b>	<b>22</b>
2.1. Rechtliche Aspekte	22
2.2. Abfallwirtschaftliche Aspekte	30
<b>3. Planung und Umsetzung des Rückbaus</b>	<b>38</b>
3.1. Planung des Rückbaus	38
3.2. Umsetzung des Rückbaus	39
<b>4. Vorkonditionierung und Stoffstromtrennung</b>	<b>43</b>
4.1. Allgemeine Vorgehensweise zur Vorkonditionierung	43
4.1.1. Technische Lösungen zur Vorkonditionierung	46
4.1.2. Erkenntnisse zur Vorkonditionierung	47
4.2. Stoffstromtrennung	50
4.2.1. Erkenntnisse zur Kunststoffabtrennung	50
4.2.2. Erkenntnisse zum Produkt „Ersatzbrennstoff“	51
4.2.3. Erkenntnisse zum Produkt „Schwergut“	53
<b>5. Behandlung der Grobfraktion &gt; 60 mm</b>	<b>54</b>
5.1. Energetische Verwertung	54
5.1.1. Eignung	54
5.1.2. Müllverbrennungsanlage	56
5.1.3. Ersatzbrennstoffkraftwerke	59
5.1.4. Zementwerke	61
5.2. Aufbereitung von Metallfraktionen mittels Pyrolyse	65

<b>5.3.</b>	<b>Behandlung von Rückständen aus der thermischen Behandlung</b>	<b>67</b>
5.3.1.	Eignung	67
5.3.2.	Konventionelle Rostaschenaufbereitung	67
5.3.3.	Weitergehende Aufbereitungsverfahren	70
<b>5.4.</b>	<b>Verwertung der abgetrennten Kunststofffraktionen</b>	<b>72</b>
5.4.1.	Werkstofflich verwertbare Kunststoffe	72
5.4.2.	Stoffliche Verwertung beim Kunststoffaufbereiter	74
<b>6.</b>	<b>Behandlung der Feinfraktion &lt; 60 mm</b>	<b>78</b>
<b>6.1.</b>	<b>Voruntersuchungen am Ausgangsmaterial</b>	<b>78</b>
<b>6.2.</b>	<b>Biologische Behandlung der Feinfraktion</b>	<b>81</b>
<b>6.3.</b>	<b>Nass-mechanische Aufbereitungsverfahren der Feinfraktion</b>	<b>83</b>
6.3.1.	Behandlung der Fraktion 10 - 60 mm in einer Setzmaschine	85
6.3.2.	Behandlung der Fraktion < 10 mm mit einem Nasstrenntisch oder Wendelscheider	88
6.3.3.	Aufbereitung des Prozesswassers zur Kreislaufführung	91
<b>7.</b>	<b>Mögliche Technologiekombinationen zur Umsetzung von ELFM-Vorhaben</b>	<b>94</b>
<b>7.1.</b>	<b>Allgemeines Vorgehen</b>	<b>94</b>
<b>7.2.</b>	<b>Technologiekombinationen</b>	<b>94</b>
7.2.1.	Szenario 1 – geringer Aufbereitungsaufwand	95
7.2.2.	Szenario 2 – mittlerer Aufbereitungsaufwand	96
7.2.3.	Szenario 3 – hoher Aufbereitungsaufwand	97
<b>7.3.</b>	<b>Erfassung und Modellierung der Stoffströme der Szenarien</b>	<b>98</b>
<b>8.</b>	<b>Ökonomische Bewertung</b>	<b>103</b>
<b>8.1.</b>	<b>Entscheidungsrelevante monetäre Größen</b>	<b>103</b>
<b>8.2.</b>	<b>Methoden zur Bewertung von Investitionsalternativen</b>	<b>105</b>
8.2.1.	Methoden der Investitionsrechnung für Vorteilhaftigkeitsent- scheidungen bei einer Zielgröße	106
8.2.2.	Ermittlung der erforderlichen Daten mittels Investitions- und Kostenschätzung	107
8.2.3.	Vorgehen zur Bewertung von ELFM im Vergleich zur Deponie- stilllegung und -nachsorge	109
<b>8.3.</b>	<b>Ergebnisse der ökonomischen Bewertung und Analyse der Einflussfaktoren auf die ökonomische Vorteilhaftigkeit eines beispielhaften ELFM-Projektes</b>	<b>111</b>
8.3.1.	Datengrundlage	111

8.3.2.	Ergebnisse der ökonomischen Bewertung und Break-Even-Analyse	114
<b>8.4.</b>	<b>Erkenntnisse der ökonomischen Bewertung</b>	<b>120</b>
<b>9.</b>	<b>Ökologische Bewertung</b>	<b>123</b>
<b>9.1.</b>	<b>Methode der Ökobilanzierung</b>	<b>123</b>
9.1.1.	Ziele	123
9.1.2.	Systembeschreibung	124
<b>9.2.</b>	<b>Untersuchte Szenarien</b>	<b>125</b>
<b>9.3.</b>	<b>Ergebnisse der ökologischen Bewertung</b>	<b>126</b>
9.3.1.	Wirkungskategorie Treibhauseffekt	126
9.3.2.	Wirkungskategorie Versauerungspotenzial	127
9.3.3.	Wirkungskategorie Eutrophierungspotenzial	128
9.3.4.	Summenparameter fossiler kumulierter Energieaufwand	129
9.3.5.	Normierung und zusammenführende Diskussion der Ergebnisse	130
<b>9.4.</b>	<b>Einflussfaktoren auf die ökologische Vorteilhaftigkeit von ELFM</b>	<b>131</b>
9.4.1.	Beschreibung der Sensitivitätsanalysen	132
9.4.2.	Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen	133
<b>9.5.</b>	<b>Erkenntnisse der ökologischen Bewertung</b>	<b>137</b>
<b>10.</b>	<b>Entscheidungsunterstützung und Handlungsempfehlungen</b>	<b>138</b>
<b>10.1.</b>	<b>Entscheidungsfindung seitens der Deponiebetreiber</b>	<b>138</b>
<b>10.2.</b>	<b>Empfehlungen an die Politik</b>	<b>140</b>
<b>10.3.</b>	<b>Vorgehen zur Ermittlung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit eines ELFM</b>	<b>141</b>
<b>10.4.</b>	<b>Vorgehen zur Ermittlung der ökologischen Vorteilhaftigkeit eines ELFM</b>	<b>143</b>
<b>10.5.</b>	<b>Beispiel der Entscheidungsfindung</b>	<b>144</b>
<b>10.6.</b>	<b>Wie ist ELFM in der Feinplanung zu konzeptionieren?</b>	<b>150</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>154</b>
<b>11.</b>	<b>ANHANG</b>	<b>163</b>
11.1.	Anhang 1	163
11.2.	Anhang 2	189

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Zeitliche Abfolge der einzelnen Deponiephasen gemäß DepV und KrWG	17
Abbildung 1-2:	Aufbau und Systematik des Leitfadens	19
Abbildung 2-1:	Zulassungsverfahren für den Deponierückbau	25
Abbildung 2-2:	Schneckenbohrung, Greiferbohrung und Großschurf in Hausmülldeponien	32
Abbildung 2-3:	Aus 60 Rückbauprojekten berechnete Abfallzusammensetzung [M.-%] (nach van Vossen, Prent 2011)	35
Abbildung 3-1:	Formen des Abgrabens des Deponats (Rettenberger 1998)	40
Abbildung 4-1:	Zusammensetzung von Deponat der Deponie „Pohlsche Heide“	44
Abbildung 4-2:	Schema der mechanischen Konditionierung	45
Abbildung 4-3:	Schema einer MBA	48
Abbildung 4-4:	Vergleich Zusammensetzung LVP und LG aus Deponat	50
Abbildung 5-1:	Optionen zur energetischen Verwertung von Fraktionen aus dem Deponierückbau	55
Abbildung 5-2:	Vereinfachte Prinzipskizze einer Müllverbrennungsanlage in Anlehnung an Baumgarte (2015)	57
Abbildung 5-3:	Vereinfachte Prinzipskizze eines Zementwerkes	63
Abbildung 5-4:	Vereinfachte Prinzipskizze einer Drehrohrpyrolyseanlage für Abfälle in Anlehnung an Hauk, Spindeldreher (2004)	66
Abbildung 5-5:	Schematischer Aufbau einer Anlage zur MVA-Rostaschen-aufbereitung	68
Abbildung 5-6:	Kupfer-Aluminium-Mischkonzentrat der Feinkornaufbereitung	71
Abbildung 5-7:	3D-Kunststoffe aus rückgebautem Deponiematerial	73
Abbildung 5-8:	Abgetrennte Folien aus rückgebautem Deponiematerial	73
Abbildung 5-9:	Verfahrensfließbild Aufbereitung von Kunststoffarten	75
Abbildung 6-1:	Sieblinien des Deponates	84
Abbildung 6-2:	Stoffliche Zusammensetzung des Deponates	85
Abbildung 6-3:	Vereinfachtes Verfahrensfließbild zur nass-mechanischen Aufbereitung von Deponat mittels Nasssetzmaschine Triple A (AGS Anlagen + Verfahren GmbH)	86
Abbildung 6-4:	Mögliche Stoffströme nach einer nass-mechanischen Aufbereitung	87
Abbildung 6-5:	Verfahrensfließbild zur Aufbereitung der Fraktion < 10 mm	90
Abbildung 6-6:	Fließschema zur Entstehung der Suspension und Rückführung des feststofffreien Prozesswassers	91



Abbildung 6-7:	Trocknungsverlauf einer Suspension aus der nass-mechanischen Aufbereitung von rückgebautem Deponat zur Bestimmung der maximalen großtechnischen Entwässerbarkeit	92
Abbildung 7-1:	Übersicht der Technologien, die zu Bewertungsszenarien kombiniert werden	95
Abbildung 7-2:	Szenarien 1a und 1b mit geringem Aufbereitungsaufwand	95
Abbildung 7-3:	Szenarien 2a und 2b mit mittlerem Aufbereitungsaufwand	96
Abbildung 7-4:	Szenario 3a mit hohem Aufbereitungsaufwand	97
Abbildung 7-5:	Szenario 3b mit hohem Aufbereitungsaufwand	98
Abbildung 7-6:	Fließbildausschnitt zur Veranschaulichung der aktivitätsanalytischen Stoffstrommodellierung	101
Abbildung 7-7:	Stoffstrommodellierung mit Umberto®	102
Abbildung 8-1:	Überblick über Methoden der Investitionsrechnung (in Anlehnung an Götze 2014)	106
Abbildung 8-2:	Genauigkeit der Ergebnisse verschiedener Investitionsschätzungsverfahren (in Anlehnung an Peters, Timmerhaus 1991 und Schatka 2011)	108
Abbildung 8-3:	Bewertungskonzept – Vergleich der Kapitalwerte von ELFM und Stilllegung und Nachsorge	109
Abbildung 8-4:	Massenbilanz Szenario 1a, 1b, 2a, 2b, 3a und 3b	112
Abbildung 8-5:	Bewertungsergebnis für die betrachteten Optionen mit dem Ziel der Flächenrückgewinnung	115
Abbildung 8-6:	Bewertungsergebnis für die betrachteten Optionen mit dem Ziel der Volumengewinnung	116
Abbildung 8-7:	Variation Grundstückspreis	116
Abbildung 8-8:	Variation Deponievolumenwert	117
Abbildung 8-9:	Variation MVA-Abgabepreis	117
Abbildung 8-10:	Variation EBS-Abgabepreis	118
Abbildung 8-11:	Variation Fe-Schrottpreis	118
Abbildung 8-12:	Variation NE-Schrottpreis	119
Abbildung 8-13:	Ergebnis der Variation mehrerer Faktoren	120
Abbildung 9-1:	Sankey-Diagramm Szenario 1a, 1b, 2a, 2b, 3a* und 3b39	125
Abbildung 9-2:	Ergebnisse zur Wirkungskategorie Treibhauseffekt	127
Abbildung 9-3:	Ergebnisse zur Wirkungskategorie Versauerungspotenzial	128
Abbildung 9-4:	Ergebnisse zur Wirkungskategorie Eutrophierungspotenzial	129
Abbildung 9-5:	Ergebnisse zum Summenparameter kumulierter fossiler Energieaufwand	130
Abbildung 9-6:	Zusammenführung der Ergebnisse als Einwohnerequivalente	131

---

Abbildung 9-7:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen zum Treibhauseffekt	134
Abbildung 9-8:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen zum Versauerungspotenzial	135
Abbildung 9-9:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen zum terrestrischen Eutrophierungspotenzial	136
Abbildung 9-10:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen zum fossilen kumulierten Energieaufwand	136
Abbildung 10-1:	Treibhauseffekt - Ergebnisse aus der Sensitivitätsberechnung zu extremen Parameterausprägungen und der Deponie „Pohlsche Heide“	145
Abbildung 10-2:	Vorgehen zur Einordnung anhand der Diagramme zur Sensitivitätsberechnung	148
Abbildung 10-3:	Ergebnisse aus der Sensitivitätsberechnung auf Basis unterschiedlicher Flächen- und Volumenwerte	149

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Verwertung verschiedener Stoffgruppen (ergänzt nach Hölzle 2010)	34
Tabelle 2-2:	Vergleich der Abfallzusammensetzung auf der Grundlage der Vorabschätzung und der ermittelten Ist-Situation (Angaben in M.-% FS)	36
Tabelle 4-1:	Mögliche Varianten der Vorkonditionierung und Voranreicherung	49
Tabelle 5-1:	Brennstoffanforderungen thermischer Anlagen	56
Tabelle 5-2:	Anforderungen und Konzentrationsbeschränkungen für den Einsatz von Abfällen in MVA	58
Tabelle 5-3:	Bandbreite möglicher Konzentrationsbeschränkungen sowie Anforderungen für den Einsatz in Ersatzbrennstoffkraftwerken	60
Tabelle 5-4:	Bandbreite möglicher Anforderungen und Konzentrationsbeschränkungen für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen im Zementwerk	64
Tabelle 5-5:	Übersicht der aus unterschiedlichen MVA-Rostaschen separierten Metallmengen	69
Tabelle 5-6:	Ergebnisse der Metallrückgewinnung mit dem RENE-Verfahren	71
Tabelle 5-7:	Erzielbare Qualitäten und DKR-Anforderungen (Auszug)	74
Tabelle 5-8:	Kunststoffausbeute nach der weitergehenden Kunststoffaufbereitung	75
Tabelle 5-9:	Mögliche Einsatzbereiche von Kunststoffarten aus dem Deponierückbau	77
Tabelle 6-1:	Abbauwürdigkeit unterschiedlicher Metalle (BGR 2012)	81
Tabelle 6-2:	Prüfkriterien für eine aerobe Nachbehandlung (geändert und ergänzt nach DWA 2002)	82
Tabelle 6-3:	Zusammenstellung von Eingangsdaten und Ergebnissen der Entwässerungsversuche	92
Tabelle 7-1:	Stoffstrommodellierung mit Excel - Szenario 2a	101
Tabelle 8-1:	Entscheidungsrelevante monetäre Größen beim Enhanced Landfill Mining (in Anlehnung an Diener et al. 2015)	104
Tabelle 8-2:	Eingabemaske TönsLM-Bewertungstool	110
Tabelle 8-3:	Zahlungen für die Deponiestillegung und -nachsorge der Deponie „Pohlsche Heide“	113
Tabelle 8-4:	Variation mehrerer Faktoren	119
Tabelle 10-1:	Parameterausprägung für die unterschiedlichen Sensitivitäten	147

## Abkürzungsverzeichnis

ArbSchG	Arbeitsschutzgesetz
BAT	Best Available Technology
BaustellV	Baustellenverordnung
BioStoffV	Biostoffverordnung
DepV	Deponieverordnung
DKR	Deutsche Gesellschaft für Kreislaufwirtschaft und Rohstoffe mbH
EBS	Ersatzbrennstoff
EBS-HKW	Ersatzbrennstoff-Heizkraftwerk
ELFM	Enhanced Landfill Mining
EW	Energiewirkungsgrad
Fe-Schrott	Eisenhaltiger Schrott
FG	Feingut
GefStoffV	Gefahrstoffverordnung
GF	Gasfassungsrate
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
LCA	Life Cycle Analysis
LG	Leichtgut
LVP	Leichtverpackungen
M.-%	Massenprozent
MBA	Mechanisch-Biologische Aufbereitungsanlage
MFR	Melt Flow Rate, Schmelzflussrate
MHKW	Müllheizkraftwerk
MVA	Müllverbrennungsanlage
NE	Nichteisen(metall)
NIR	Nah-Infrarot
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PVC	Polyvinylchlorid
SBS	Sekundärbrennstoffe
SG	Schwergut
SiGe-Plan	Sicherheits- und Gesundheitsschutzplan
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
UVPG	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung
WSG	Wertstoffgehalt

## Vorwort

*Michael Krüger, Bernd Becker, Kai Münnich*

Kann die Menschheit überleben? Diese Frage stellte sich Jay W. Forrester (Forrester 1972). Die wichtigsten Faktoren Bevölkerungszahl, Kapitalinvestitionen, Rohstoffreserven, landwirtschaftliche Produktion sowie Umweltverschmutzung wurden in ein Modell eingebaut, welches als Globalmodell der Menschheitskrise bezeichnet wurde. Das Buch schließt damit, dass der Übergang vom Stadium des Wachstums in einen weltweiten nachhaltigen Gleichgewichtszustand die größte Aufgabe sei, die es zu bewältigen gilt. Der Autor brachte seine Hoffnung zum Ausdruck, dass die Dynamik des Wachstums und des Übergangs zum Gleichgewicht von mehr Menschen als heute erforscht wird und sich aus dem erarbeiteten Wissen ein sachlicher Konsens ergibt, um angemessene neue Ziele und Wertvorstellungen für die Menschheit zu entwickeln und ein darauf basierendes weltweites politisches Handeln auszurichten.

Der vorliegende Leitfaden behandelt einen kleinen Teilbereich dieser großen Fragestellung im Bereich Deponierückbau (Landfill Mining). Landfill Mining - nur Vision oder ernstzunehmende Strategie im Umgang mit Deponien? Oder anders ausgedrückt: Können Abfälle von gestern Ressourcen von morgen sein? Diese Arbeit soll also einen Beitrag zur Durchsetzung eines ressourcenorientierten Landfill Minings, dem sogenannten Enhanced Landfill Mining (ELFM) leisten. Kann ein ELFM einen Beitrag zum Abbau der vorhandenen Umweltbelastung leisten und können weitere Belastungen vermieden werden?

Dazu hat sich 2012 eine Gruppe von Unternehmen und Forschungsinstituten zusammengetan, um in einem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten und vom Forschungszentrum Jülich GmbH (PTJ) begleiteten Verbundprojekt, welches TönsLM genannt wurde, zu forschen. Die Aufgabenstellung zur „Entwicklung innovativer Verfahren zur Rückgewinnung ausgewählter Ressourcen aus Siedlungsabfall- und Schlackedeponien“ wurde aufgrund der Aktualität des Themas „kritische Metalle“ gewählt. Vornehmliches Ziel war es, durch die intensive Zusammenarbeit von Wissenschaft und Wirtschaftsunternehmen zu prüfen, unter welchen Randbedingungen ein ELFM ökologisch und ökonomisch durchgeführt werden kann.

Im vorliegenden Leitfaden werden die objektiven Aspekte des ELFM, nämlich die rechtlichen, technischen, ökonomischen und ökologischen Aspekte beschrieben. Das vorliegende Buch ist aufgrund der interdisziplinären Zusammenarbeit von Mitarbeitern aus Unternehmen, Forschungsinstituten und Verwaltung sowohl **Leitfaden**, Lehrbuch und Forschungsbericht (wenn auch im geringeren Umfang) zugleich.

Zur Erleichterung für den Leser wurden daher den Kapiteln verbindende Kommentare vorangestellt, so dass diese einerseits inhaltlich eingeleitet werden, andererseits aber auch der Kontext zum Gesamthema ELFM verdeutlicht wird.

Die Teilergebnisse aus den Untersuchungen an der Schlackedeponie sind in diesen Leitfaden nicht mit aufgenommen worden, da die Vorgehensweise beim Rückbau in vielen Bereichen grundsätzlich anders ist als bei Siedlungsabfalldeponien. Die Ergebnisse werden gesondert veröffentlicht.

Der vorliegende Leitfaden richtet sich sowohl an die Entscheidungsträger in den Verantwortungsbereichen der zuständigen kommunalen Ebenen, den Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden und vor allem auch an die politischen Entscheidungsträger auf den

verschiedenen Verwaltungsebenen. Des Weiteren soll er für alle Interessengruppen im Bereich der Fachverbände, der Wissensvermittlung, der Planung, der operativ Ausführenden eine Basis zur praktischen Umsetzung der Aufgabenstellung eines ELFM sein.

Die Autoren sind dabei der Überzeugung, dass ein ELFM nicht eine Frage des ob, sondern nur eine Frage der vorhandenen, der eintretenden oder zu schaffenden Bedingungen ist.

Um einen schnellen Einstieg in die Problemstellung des ELFM zu ermöglichen, wird empfohlen, zuerst die Kapitel Zusammenfassung, 1 und 10 zu lesen. Im Ergebnis wird der Leser in die rechtlichen und technischen Kapitel 2 - 6 sowie in die Bewertungskapitel Technologiekombinationen, Ökonomie und Ökologie (7 – 9) geleitet. Hier wird sich dann ein eingehendes Studium der jeweiligen Kapitel nicht vermeiden lassen.

An dieser Stelle sei uns ein Wort des Dankes gestattet, gerichtet vor allem an

- das Bundesministerium für Bildung und Forschung vertreten durch Professorin und Ministerin Johanna Wanka sowie PD Dr. Lothar Mennicken vom Referat Ressourcen und Nachhaltigkeit als Förderer des Projektes,
- das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen als assoziierter Partner und Unterstützer,
- den Kreis Minden-Lübbecke, vertreten durch Landrat Dr. Ralf Niemann, mit dem Entsorgungszentrum des Kreises Minden-Lübbecke,
- das Unternehmen Tönsmeier vertreten durch Herrn Jürgen Tönsmeier und Bernd Ranneberg.

Darüber hinaus gilt unser Dank den zahlreichen Unterstützern, Wissenschaftlern und Praktikern, die mit Rat und Tat die Entstehung dieser Arbeit förderten: Herr Dr. Engelmann (UBA, Dessau), Herr Dr. Jacobi (stellvertretend für den PTJ, Berlin), Herr Schulte (Ehrevorsitzender InwesD, Minden), den Firmen EEW (Hannover), EAB (Bernburg), IRS, PEG (Paderborn), Cemex und Holcim (Beckum), grontmij (Köln), M+S Transporte, Gesellschaft zur Verwertung organischer Abfälle, AML-IMMOBILIEN GmbH, Herz- und Diabeteszentrum MRW, Ingenieurbüro Hansmeier, CDM Smith Consult (Bochum und Alsbach), RUK Ingenieurgruppe (Stuttgart), Main-Taunus-Recycling GmbH (Flörsheim-Wicker) sowie Fraunhofer-UMSICHT (Sulzbach-Rosenberg).

Für die redaktionelle Bearbeitung des Leitfadens danken wir besonders Frau Meyer-Hanschen vom Öko-Institut (Berlin).

Der größte Dank gehört jedoch jenen Lesern des Leitfadens, die sich die Mühe machen, uns mitzuteilen, was sie an dem Buch hilfreich fanden und welche Bereiche sie gern erweitert oder ggf. für eine zukünftige Auflage neu aufgenommen sehen.

Dr.-Ing. Michael Krüger (Karl Tönsmeier Entsorgungswirtschaft GmbH & Co. KG, e-mail [krueger@toensmeier.de](mailto:krueger@toensmeier.de), Tel. 0571/9744-203)

Dipl.-Ing. Bernd Becker (Abfallentsorgungsbetrieb des Kreises Minden-Lübbecke, e-mail [bernd.becker@aml-immo.de](mailto:bernd.becker@aml-immo.de), Tel. 0571/50929-127)

Dr.-Ing. Kai Münnich (Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig, e-mail [k.muennich@tu-bs.de](mailto:k.muennich@tu-bs.de), Tel. 0531/391-3962)

## Zusammenfassung (Management Summary)

*Michael Krüger, Bernd Becker, Kai Münnich, Klaus Fricke*

Der Rückbau deponierter Abfälle (Landfill Mining) wird weltweit seit über 60 Jahren betrieben, vornehmlich mit dem Ziel der Gewinnung von Deponievolumen, der Deponiesanierung zum Grundwasserschutz und der höherwertigen Nutzung der Deponiefläche. In der Regel sind die wesentlichen Stoffströme lediglich auf andere Flächen umgelagert worden. Ein Deponierückbau unter dem primären Aspekt der Rückgewinnung von Rohstoffen, Enhanced Landfill Mining (ELFM), ist bisher nicht durchgeführt worden.

Erstmals wurde im Rahmen eines durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten FuE-Vorhabens (FKZ 033R090A-F) eine ganzheitliche Betrachtung eines ELFM vorgenommen. Auf der Basis von systematisch durchgeführten, großtechnisch angelegten Praxisversuchen, die sämtliche Prozessstufen, wie Rückbau, Vorkonditionierung und Stoffstromtrennung, stoffstromspezifische Behandlung der Grob- und Feinfraktion beinhalteten sowie der ökologischen und ökonomischen Bewertung von möglichen Technologiekombinationen wurde ein Leitfaden mit dem Ziel erarbeitet, Hilfen bei der Entscheidungsfindung zu geben, ob ein ELFM für den konkreten Standort eine Alternative zur gesetzlich geforderten Stilllegung und Nachsorge der Deponie darstellt.

Die Beantwortung der Fragestellung erfolgt auf der Grundlage der Forschungsaktivitäten am Standort „Pohlsche Heide“ des Kreises Minden Lübbecke durch:

### **Planung, Vorbereitung und Umsetzung des Rückbaus**

In diesem Abschnitt (Kapitel 1 – 6) werden die wesentlichen rechtlichen, abfallwirtschaftlichen und technischen Grundlagen für ein ELFM erläutert und bewertet:

- Rechtliche Einordnung des Deponierückbaus nach Abfall- oder Bodenschutzrecht,
- Abschätzung der Wertstoffpotenziale auf der Grundlage historischer Erkundungen und Probebohrungen,
- Rückbau der Deponie,
- Vorkonditionierung des Deponats zur Herstellung gezielter Stoffströme mittels mobiler und stationärer Anlagen,
- Behandlung der Grobfraktion in Sortieranlagen,
- stoffliche Verwertung der Leichtfraktion,
- energetische Verwertung des Deponats bzw. der Leichtfraktion,
- thermische Behandlung von Verbundstoffen vor der Metallaufbereitung,
- Abtrennung von Metallen in der Grob- und Feinfraktion sowie
- nass-mechanische Aufbereitung der Feinfraktion zur Separation von Wertstoffen.

Im Ergebnis ergibt sich die Möglichkeit eines ELFM bei Umsetzung der rechtlichen und technischen Empfehlungen.

### **Entwicklung von Technologiekombinationen und deren ökonomische und ökologische Bewertung**

In diesem Abschnitt (Kapitel 7 – 9) werden Technologiekombinationen (Szenarien) für ein ELFM gewählt, erläutert und bewertet, im Einzelnen:

- Szenarien mit geringem Aufbereitungsaufwand: weitgehende energetische Verwertung des Deponats,
- Szenarien mit mittlerem Aufbereitungsaufwand: differenzierte Aufbereitung zur stofflichen und energetischen Verwertung mit am Markt etablierten Technologien sowie
- Szenarien mit hohem Aufbereitungsaufwand: Optimierung der Wertstoffgewinnung durch den Einsatz von weiter- und neuentwickelten Aufbereitungstechnologien.

Im Ergebnis erfolgt eine ganzheitliche ökonomische und ökologische Betrachtung und Bewertung.

Grundsätzlich gilt, dass die Wirtschaftlichkeit und die ökologische Auswirkung des ELFM stark standortabhängig sind, eine Prüfung ist grundsätzlich für alle Standorte empfehlenswert.

Die **ökonomische Bewertung** erfolgt unter Einbeziehung der Wechselwirkungen u. a. zwischen Aufwendungen für das ELFM, den Erlösen aus den Wertstoffen, den Einsparungen bei der Stilllegung und Nachsorge, dem Gewinn an Deponievolumen sowie des Flächenrecyclings. Auf der Basis der im Forschungsvorhaben gewonnenen Praxiserfahrung werden die Randbedingungen aufgezeigt, unter denen ein ELFM ökonomisch „selbsttragend“ werden kann. Der Aspekt der Wertstoffrückgewinnung ist nach derzeitigem Stand kein alleiniges Argument für einen Rückbau.

Die **ökologische Bewertung** basiert auf dem Vergleich der in der Stilllegungs- und Nachsorgephase bzw. der beim Deponierückbau unter Zugrundelegung der verschiedenen Technologiekombinationen entstehenden Umweltauswirkungen. Die Berechnungen zeigen, dass in der Regel mit steigendem Aufbereitungsaufwand die Entlastung der Umwelt deutlich zunimmt. Zusätzlich werden Sensitivitätsanalysen in Bezug auf den Wertstoffgehalt, den Wirkungsgrad bei der energetischen Verwertung und den Gaserfassungsgrad der bestehenden Deponie vorgenommen. Auf der Basis der im Forschungsvorhaben gewonnenen Praxiserfahrung werden die Randbedingungen aufgezeigt, unter denen ein ELFM ökologisch vorteilhaft werden kann.

Im Ergebnis ergibt sich unter Beachtung der wesentlichen Randbedingungen und Sensitivitäten, dass:

- ein ELFM für Deponien in Deutschland, die dem Stand der Technik entsprechen, in der Regel dann ökonomisch vorteilhaft ist, wenn neues Deponievolumen benötigt wird, die Kosten der Stilllegung und Nachsorge sehr hoch sind, sowie Standortvorteile (z. B. freie Aufbereitungskapazitäten, geringe Transportkosten) vorhanden sind,
- ein ELFM insbesondere für Deponien dann ökologisch vorteilhaft ist, wenn sie sich in der Ablagerungsphase befinden, ein Potenzial an Restverfüllvolumen besitzen und keine endgültige Oberflächenabdichtung aufweisen sowie
- hohe energetische Wirkungsgrade der zur Verfügung stehenden Anlagen zur energetischen Verwertung der heizwertreichen Bestandteile sowie hohe Metallgehalte im Deponat sich sowohl ökonomisch als auch ökologisch positiv auf ein ELFM auswirken.



Liegt durch die Deponie eine Gefährdung der Schutzgüter vor oder befindet sich die Deponie in einer Metropolregion, ist die ökonomische Vorteilhaftigkeit von ELFM bereits heute gegeben.

### **Handlungsempfehlungen**

Aufbauend auf den Ergebnissen der Kapitel 1 - 6 sowie 7 - 9 erfolgt eine Unterstützung bei der Entscheidungsfindung Deponierückbau „ja oder nein“. Hierzu sind einzelne Prüfungsfragen zu beantworten. Nach der Beantwortung der Fragen kann dann eine Entscheidung zum „ja oder nein“ des ELFM getroffen werden. Ein ELFM wird dann positiv entschieden, wenn die Umsetzung ökonomisch und ökologisch vorteilhaft ist und wenn die Öffentlichkeit gemeinsam mit der Politik dem jeweiligen Vorhaben zustimmt.

Ist die Vorteilhaftigkeit für ein ELFM belegt, kann in die Detailplanung gegangen werden, zu der ebenfalls Handlungsempfehlungen gegeben werden.

Anhand eines konkreten Beispiels wird die Entscheidungsfindung nachvollziehbar dargestellt.

Für den im Rahmen des Forschungsvorhabens untersuchten Standort „Pohlsche Heide“ im Entsorgungszentrum des Kreises Minden-Lübbecke ergibt sich eine Empfehlung zum Rückbau der Deponie mit einer Verfahrenskombination mittlerer Aufbereitungstiefe.

Grundsätzlich ist eine periodische Prüfung „ELFM: ja oder nein“ für alle in Frage kommenden Standorte empfehlenswert.

Der vorliegende Leitfaden weist nach, dass ELFM ein notwendiger Baustein für einen nachhaltigen Wandel von einer Abfall- zur Ressourcenwirtschaft ist!

Gerade in den Schwellen- und Entwicklungsländern mit der Problematik nicht ausreichend zur Verfügung stehender Flächen und Deponievolumina sowie der mangelhaften Deponietechnik ist anzustreben, möglichst umgehend eine Planung für ein ELFM vorzunehmen.

Es stellt sich insgesamt nicht die Frage nach dem „ob“, sondern nach der Auswahl der in Frage kommenden Standorte, nach der politischen Unterstützung, der öffentlichen Akzeptanz sowie der Umsetzung eines ELFM als Alternative zur gesetzlichen Nachsorgeverpflichtung. Richtungsweisend hat das Forschungsvorhaben gezeigt, dass ein ELFM sowohl unter technischen, ökologischen als auch unter ökonomischen Bedingungen möglich ist.

Die Umsetzung eines ELFM sollte am Standort Deutschland möglichst schnell umgesetzt werden.



## 1. Einleitung

*Michael Krüger, Bernd Becker, Kai Münnich, Klaus Fricke*

### 1.1. Ausgangslage und Problemstellung

Die Wiederaufnahme von bereits auf Hausmülldeponien abgelagerten Abfällen wird weltweit seit über 60 Jahren betrieben. Die Gründe für das Landfill Mining haben sich mit der Zeit geändert. So lag der Schwerpunkt in Deutschland in den 80er und 90er Jahren vornehmlich auf der Gewinnung von Deponievolumen und der Deponiesanierung. In der Zwischenzeit wurden weltweit an mehr als 85 Standorten Abfälle wieder aufgenommen, wobei meistens Gründe des Grundwasserschutzes oder der höherwertigen Nutzung der Flächen im Vordergrund standen. In der Vergangenheit wurden bei diesen Projekten vergleichsweise geringe Stoffströme gezielt einer Verwertung zugeführt; in der Regel sind die wesentlichen Stoffströme lediglich auf andere Flächen umgelagert worden. Insgesamt ist in den letzten Jahren weltweit eine stetige Zunahme der Anzahl an Deponierückbaumaßnahmen erkennbar. Im Rahmen des viel diskutierten Urban Minings kann das Landfill Mining mit Wertstoffrückgewinnung eine wichtige Größe darstellen.

Allerdings ist ein Deponierückbau unter dem Aspekt der möglichst weitgehenden Rückgewinnung von Rohstoffen bisher nicht durchgeführt worden.

Die bisher durchgeführten Projekte zeigen, dass der Rückbau von Deponien sowie die anschließende mechanische Materialaufbereitung grundsätzlich machbar sind.

Details zur angewandten Technik für die Verfahrensstufen Rückbau, Aufbereitung und Sortierung, Wertstoffkonditionierung, Stoffstromtrennung mit anschließender stoffstromspezifischer Behandlung stehen nicht in ausreichend belastbarer Form zur Verfügung. Insbesondere mangelt es an spezifischen Informationen über die Quantität und Qualität der im Deponiekörper eingebauten Stoffe und der hieraus erzielbaren Produktqualitäten. Dies gilt im Besonderen für Metalle und Mineralien.

Bezüglich der Investitionen und Betriebskosten liegen Informationen, wenn überhaupt, nur bruchstückhaft vor. Gleiches gilt für ökologische Betrachtungen. Dies betrifft insbesondere Fragen zur Ressourceneffizienz aber auch die mögliche Reduktion deponiebürtiger Emissionen.

Ganzheitliche Kostenbetrachtungen unter Einbeziehung der Wechselwirkungen u. a. zwischen Aufwendungen für den Rückbau, den Einsparungen bei der Stilllegung und Nachsorge sowie des Flächenrecyclings sind bisher nicht vorhanden.

### 1.2. Begriffsbestimmungen im Rahmen des Deponierückbaus

Eine Abgrenzung der im Rahmen des Deponierückbaus verwendeten Begriffe sowie die Festlegung, welche Definition im Folgenden verwendet wird, ist erforderlich, damit der Leitfadennutzer die jeweilige Sichtweise erkennen und die Motivation für bestimmte Schritte verstehen kann.

Der Begriff Deponierückbau bezeichnet die vollständige oder abschnittsweise Wiederaufnahme von alten Abfallablagerungen und die erneute Deponierung der Abfälle nach einer möglichen mechanischen, biologischen oder thermischen Behandlung unter Ein-

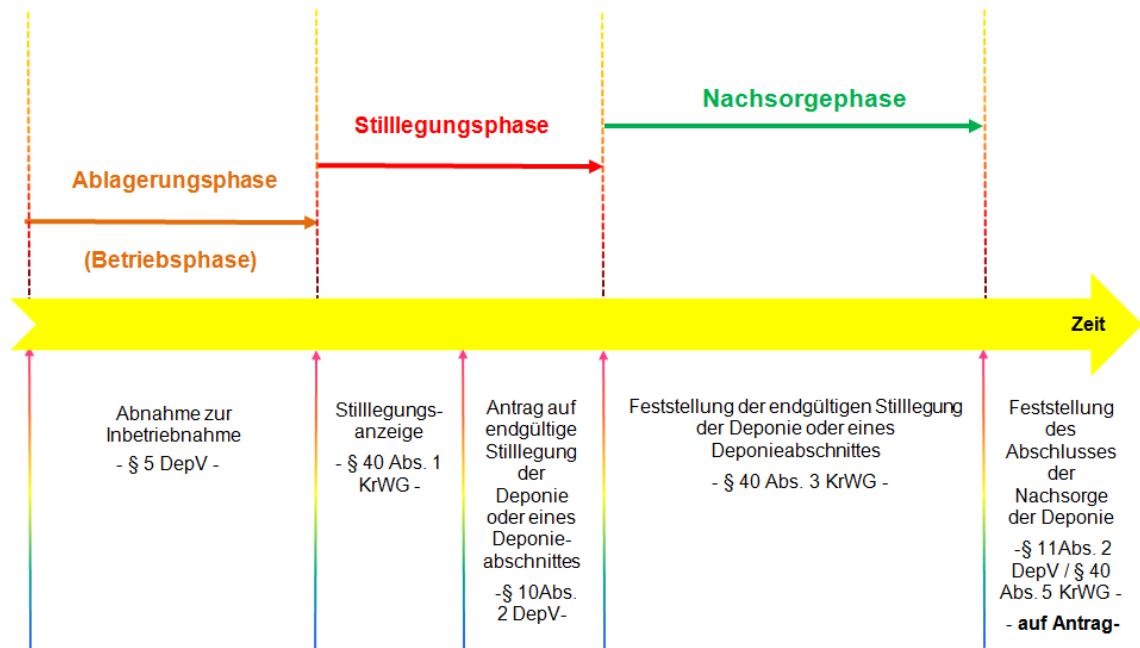
haltung gesetzlicher Vorgaben bzgl. Arbeits- und Nachbarschaftsschutz. Hierbei werden Gefahrstoffe aussortiert, wirtschaftlich relevante Wertstofffraktionen einer Verwertung zugeführt und nicht verwertbare Anteile nach einer Separation an der Stelle des Ausbaus oder auf einer anderen Deponie wieder abgelagert. Gemäß DepV werden nicht ablagerungsfähige Fraktionen einer geeigneten Entsorgung zugeführt. In Abgrenzung dazu wird bei einer Deponieumlagerung kein Material aussortiert (vgl. Rettenberger 2002, Bockreis 2011 und Brammer et al. 1997). Bezüglich der Definition des Begriffs „Landfill Mining“ besteht Uneinigkeit in der Literatur. Einerseits wird „Landfill Mining“ mit „Deponierückbau“ gleichgesetzt, andererseits wird hierunter seit einigen Jahren der Deponierückbau mit dem primären Ziel der Wertstoffrückgewinnung als Teilgebiet des Urban Mining<sup>1</sup> verstanden. Letzteres entspricht der Definition von Jones et al. (2013), die im Englischen „Enhanced Landfill Mining“ als die umfassende Erschließung der unterschiedlichen, abgelagerten Abfallströme zu Wertstoffen und Energie mit Hilfe von innovativen Technologien unter stringenter Berücksichtigung von sozialen und ökologischen Kriterien definieren. Um Verwechslungen zu vermeiden, soll im Folgenden der Begriff „Enhanced Landfill Mining (ELFM)“ verwendet werden, wenn von Deponierückbau mit angeschlossener Wertstoffrückgewinnung die Rede ist.

Entscheidend im Rahmen des ELFM ist, wann mit der Phase des Rückbaus begonnen wird. Der §2 der DepV unterscheidet zwischen aufeinanderfolgenden Phasen einer Deponie (s. Abbildung 1-1):

- Ablagerungsphase: Zeitraum von der Abnahme der für den Betrieb einer Deponie oder eines Deponieabschnittes erforderlichen Einrichtungen durch die zuständige Behörde bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Ablagerung von Abfällen beendet wird,
- Stilllegungsphase: Zeitraum vom Ende der Ablagerungsphase der Deponie oder eines Deponieabschnittes bis zur endgültigen Stilllegung der Deponie oder eines Deponieabschnittes nach § 40 Absatz 1; 2 des KrWG. Die zuständige Behörde hat nach § 40 Abs. 3 die endgültige Stilllegung festzustellen sowie
- Nachsorgephase: Zeitraum nach der endgültigen Stilllegung gemäß § 40 Abs. 3 einer Deponie oder eines Deponieabschnittes bis zu dem Zeitpunkt, zu dem die zuständige Behörde nach § 40 Absatz 5 des KrWG den Abschluss der Nachsorge der Deponie feststellt.

---

<sup>1</sup> Urban Mining bedeutet „städtischer Bergbau“ und steht für die Erschließung von Wertstoffen aus anthropogenen Lagerstätten; für weitere Informationen vgl. Fricke et al. (2011)



**Abbildung 1-1:** Zeitliche Abfolge der einzelnen Deponiephasen gemäß DepV und KrWG

Prinzipiell kann mit einem ELFM in allen drei Phasen begonnen werden. Je früher mit der Rückbauphase begonnen wird, desto geringer ist der Umfang der bereits getätigten Ausgaben in Hinblick auf den Deponieabschluss. Ein Rückbau wird bei weit fortgeschrittener Nachsorgephase vermutlich kaum durchgeführt werden, es sei denn äußere Gründe, wie z. B. Flächenrecycling, sprechen dafür.

### 1.3. Zielsetzung und Vorgehensweise

Das Ziel des vorliegenden Leitfadens ist es, Deponiebetreibern, politischen Entscheidungsträgern, Aufsichts- und Genehmigungsbehörden sowie allen Interessierten ein Gesamtkonzept zur Planung und Umsetzung eines ELFM-Vorhabens vorzustellen. Hierfür werden bestehende und innovative Technologien zur umfassenden Wertstoffrückgewinnung untersucht sowie mögliche Technologiekombinationen erläutert und deren ökonomische und ökologische Auswirkungen aufgezeigt. Einerseits erhält der Leser hierdurch einen ersten Eindruck, unter welchen Rahmenbedingungen ein ELFM mit welchen Technologien sinnvoll sein kann. Andererseits wird ihm ein Vorgehen dargestellt, wie für eine bestimmte Deponie die technische und rechtliche Machbarkeit sowie die ökonomische und ökologische Vorteilhaftigkeit analysiert werden kann.

Gemäß des in den letzten Jahren stattfindenden Paradigmenwechsels der Abfallwirtschaft von einer reinen Entsorgungswirtschaft hin zu einer ressourcenorientierten Wirtschaftsweise ist die Einbindung bestehender Deponieflächen als Lagerstätten wertvoller Sekundärrohstoffe in eine moderne Ressourcenwirtschaft notwendig und folgerichtig. Aufgrund des von Deponien ausgehenden Gefährdungspotenzials und der dadurch notwendigen langen Nachsorgezeiträume ist in eine ganzheitliche Betrachtung auch der volkswirtschaftlich wirksame Flächenverbrauch mit einzubeziehen.

Hieraus ergeben sich zwei übergeordnete Gründe für die Durchführung eines Deponierückbaus:

1. Vermeidung von unnötigem Aufwand und Umweltbeeinträchtigungen im Verlauf langer Nachsorgezeiträume – insbesondere durch Siedlungsabfalldeponien – sowie Rückgewinnung anderweitig nutzbarer Flächen.
2. Gewinnung, Aufbereitung und Nutzung werthaltiger Rohstoffe und der damit einhergehende Beitrag zum Ressourcenschutz.

Diese Ziele stehen im Spannungsfeld mit den bei einem ELFM anfallenden Kosten und punktuellen Emissionen sowie bestehenden rechtlichen und gesellschaftlichen Vorgaben.

Für die Durchführung des Rückbaus kann in großem Umfang auf bestehende Infrastrukturen und Techniken zurückgegriffen werden. Diese müssen jedoch im Rahmen der zu erstellenden Gesamtkonzeption an die veränderten Bedingungen adaptiert werden. Aufgrund der Analyse der zu gewinnenden Daten, Materialansprachen und Aufbereitungsversuche sind die am besten geeigneten Verfahren und Techniken einzusetzen.

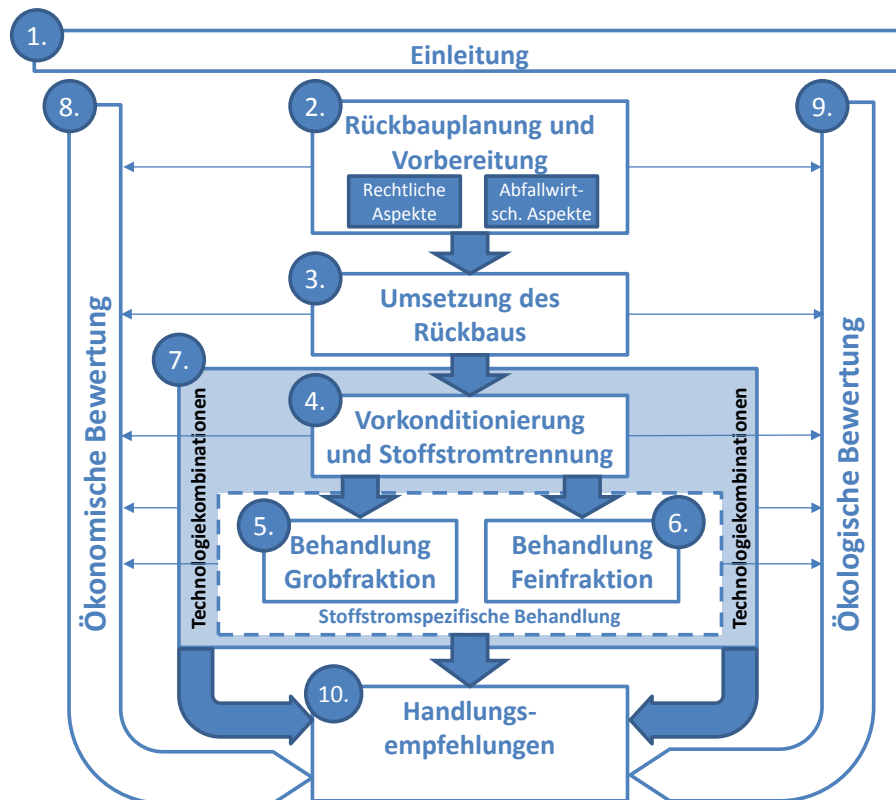
In Abhängigkeit vom Ressourcenpotenzial und der spezifischen technischen Ausstattung sowie den lokalen Gegebenheiten einer Deponie müssen die Gewinnungs- und Behandlungsverfahren sowie Nutzungsoptionen definiert werden.

Es muss eine umfassende Betrachtung der in den abgelagerten Abfällen (Deponate) enthaltenen Ressourcenpotenziale erfolgen und daraufhin ein ökonomisch-ökologisches Gesamtkonzept zu deren Gewinnung und Nutzung erstellt werden. Dies beinhaltet sowohl die stoffliche wie auch die energetische Nutzung jeweils geeigneter Abfallfraktionen.

Da kein Stand der Technik für die Rohstoffrückgewinnung und die Konditionierung von Deponaten vorhanden ist, können aufgrund der im Leitfaden enthaltenen Hinweise und Empfehlungen auf der Grundlage von Abfallzusammensetzungen die notwendigen Prozesse und Techniken bestimmt werden. Bisher durchgeführte Projekte hatten vor allem den Ansatz, einzelne Stoffgruppen spezifisch zurückzugewinnen, was unter Umständen zu einer fehlenden Betrachtung der gegenseitigen Beeinflussung bei einer umfassenden und ganzheitlichen Rohstoffrückgewinnung führt.

Ein ELFM schafft damit einen maßgeblichen Beitrag zur Rohstoffsicherung und zum Flächenrecycling bzw. zur Altlastensanierung. Aufgrund der Vermeidung von Deponieemissionen über zum Teil sehr lange Nachsorgezeiträume ist ein erheblicher Beitrag zum Klimaschutz (Vermeidung von Deponiegasen) sowie zum Grundwasser- und Gewässerschutz (Vermeidung von Sickerwasseremissionen) zu erwarten.

Als Folge eines ELFM werden Abfallfraktionen erneut in die Entsorgungswirtschaft eingebracht. So können die häufig diskutierten Überkapazitäten in einigen Bereichen der Abfallwirtschaft teilweise kompensiert werden.

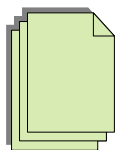


**Abbildung 1-2:** Aufbau und Systematik des Leitfadens

Die Vorgehensweise und Systematik des vorliegenden Leitfadens ist in Abbildung 1-2 dargestellt.

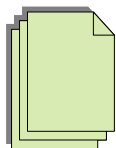
Die Entscheidungsunterstützung und die Entwicklung der Handlungsempfehlungen „ELFM: ja oder nein“ (Kapitel 10) basiert auf den im Folgenden dargestellten Fragestellungen in den Bereichen Recht, Deponie und Technik (Kapitel 2 bis 6) sowie der Auswahl und ökonomischen und ökologischen Bewertung von Technologiekombinationen (Kapitel 7 bis 9).

### Planung, Vorbereitung und Umsetzung des Rückbaus



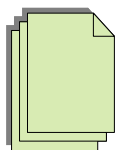
#### **Kapitel 2**

*Welche genehmigungsrechtlichen Anforderungen sind zu erfüllen?  
Welches Ressourcenpotenzial bietet die betreffende Deponie?*



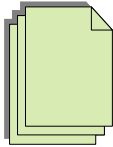
#### **Kapitel 3**

*Mit welchen technologischen Konzeptionen/Verfahren und Aggregaten sind eine Materialentnahme bzw. ein ELFM und eine erforderliche Aufbereitung effizient realisierbar?*

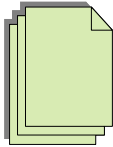


#### **Kapitel 4**

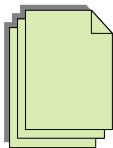
*Welche Sekundärrohstoffe können aus der Grobfraktion in welchen Mengen und Qualitäten bereitgestellt werden und welche Produkte können erzeugt werden?*

**Kapitel 5**

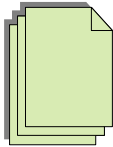
*Welche Verwertungswege (stofflich oder energetisch) der Stoffströme aus der Vorkonditionierung sind darstellbar?*

**Kapitel 6**

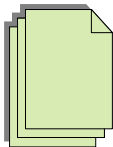
*Welche Sekundärrohstoffe können aus der Feinfraktion in welchen Mengen und Qualitäten bereitgestellt werden und welche Produkte können erzeugt werden?*

**Entwicklung von Verfahrenskombinationen und deren ökonomische und ökologische Bewertung****Kapitel 7**

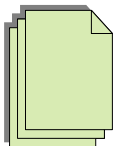
*Welche sinnvollen Technologiekombinationen ergeben sich aus den Erkenntnissen der Kapitel 2 – 6?*

**Kapitel 8**

*Unter welchen Rahmenbedingungen ist ein ELFM gegenüber konventionellen Optionen (bestehende Stilllegungs- und Nachsorgekonzepte) ökonomisch gleichwertig oder vorteilhaft?*

**Kapitel 9**

*Unter welchen Rahmenbedingungen ist ein ELFM gegenüber konventionellen Optionen (bestehende Stilllegungs- und Nachsorgekonzepte) ökologisch gleichwertig oder vorteilhaft?*

**Handlungsempfehlungen****Kapitel 10**

*Im Ergebnis steht den Entscheidungsträgern ein Instrument zur Verfügung, das unter Berücksichtigung der relevanten technischen, ökologischen und ökonomischen Randbedingungen des jeweiligen Deponiestandortes eine Objektivierung der Entscheidungsfindung ermöglicht.*

Zum besseren Verständnis des Leitfadens wird angemerkt, dass auf der Basis der Ergebnisse der Kapitel 2 – 6 die Wahl bestimmter Technologien und die Zusammenführung zu Technologiekombinationen erfolgt (Kapitel 7). Mit Hilfe von Simulationen werden die Massenbilanzen der verschiedenen Technologiekombinationen sowohl für gute als auch für schlechte Trennwirkungsgrade ermittelt. Die Massenbilanzen für die unterschiedlichen Wirkungsgrade gehen dabei maßgeblich in die ökologische und ökonomische Bewertung ein. Die Ergebnisse ermöglichten so erst eine Grobplanung von Anlagen zur Behandlung der Grob- und Feinfraktion.

Darüber hinaus wird sich zeigen, dass die Ergebnisse der Kapitel 8 und 9 auf drei Technologiekombinationen (Szenarien) mit jeweils zwei Ausprägungen beruhen, die sich bezüglich des Aufbereitungsaufwandes wie folgt unterscheiden:



- Szenarien mit geringem Aufbereitungsaufwand: weitgehende energetische Verwertung des Deponats,
- Szenarien mit mittlerem Aufbereitungsaufwand: differenzierte Aufbereitung zur stofflichen und energetischen Verwertung sowie
- Szenarien mit hohem Aufbereitungsaufwand: Optimierung der Wertstoffgewinnung durch Einsatz und Weiterentwicklung von Aufbereitungstechnologien.

Hierbei muss unbedingt berücksichtigt werden, dass die ersten beiden Szenarien mit am Markt etablierten Technologien arbeiten, während im dritten Szenario noch zusätzlicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht.

Diese Vorgehensweise macht deutlich, dass bei einem Interesse an der Durchführung eines ELFM (Kapitel 10) eine Planung, Vorbereitung und Umsetzung des Rückbaus sowie eine geeignete Verfahrensauswahl mit ökonomischer und ökologischer Bewertung dazugehört.

## 2. Vorbereitende Arbeiten zum Deponierückbau

*Bernd Becker, Kai Münnich, Klaus Fricke*

Im Kapitel 2 werden die für eine Planung des Deponierückbaus im Vorfeld zu ermittelnden rechtlichen und abfallwirtschaftlichen Voraussetzungen aufgezeigt.

Der Abschnitt 2.1 zeigt, dass es derzeit an einer Rechtsgrundlage für die Genehmigung von Deponierückbauvorhaben mangelt. Grundsätzlich sind aber Regelungsansätze vorhanden, die geeignet sind, auch eine Rohstoffsicherung in Deponien zu regeln. Die jeweiligen gesetzlichen und noch zu schaffenden Voraussetzungen werden beschrieben. Im Abschnitt 2.2 wird auf die Bestandsaufnahme des Deponiekörpers, d. h. auf die Datenaufnahme sowie die eventuell durchzuführenden Untersuchungen am Deponiekörper mit Probennahme und -analyse eingegangen. Auf die Problematik der Übertragbarkeit von Abfallzusammensetzungen, die z. B. an anderen Deponien oder auch anhand von Bohruntersuchungen gewonnen wurden, wird eingegangen. Die potentiell im Deponat enthaltenen Wertstoffe sowie deren Verwertungsmöglichkeiten werden dargestellt.

Die Abschätzung des Deponieinventars und der Anteile an recycelbaren Wertstoffen ermöglicht eine Planung zur technischen Umsetzung (s. Kapitel 3) und gibt Hinweise auf eine ökonomische Bewertung des Deponierückbaus.

### 2.1. Rechtliche Aspekte

Die Gesetzgebung in Deutschland hat durch die Abfallgesetzgebung und deren gesetzliches Unterregelwerk die Grundlage geschaffen für eine geordnete Abfallwirtschaft, aus der sich der Deponierückbau rechtlich ableiten lässt.

In der Rückbauplanung und -vorbereitung ist es maßgeblich, sich über die rechtliche Fragestellung Klarheit zu verschaffen. Dies ist der wesentliche Aspekt in der Planungsphase neben den anderen Gründen, die für einen Deponierückbau oder Teilrückbau in Frage kommen.

Deponierückbau ist die Abgrabung der auf einer Deponie abgelagerten Abfälle einschließlich deren Aufbereitung und Verwertung. Die Abfälle, die nicht verwertet werden können, sind wieder ordnungsgemäß zu entsorgen.

Ohne eine eindeutige Regelung der rechtlichen Voraussetzungen für die erforderliche zu schaffende Genehmigungsgrundlage ist ein Rückbau nicht möglich.

Hierzu wurde mit dem assoziierten Partner, dem Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Referat IV-4 (Bodenschutz und Altlasten, Deponien) ein **rechtlicher Leitfaden** entwickelt, der diesem Leitfaden **als Anhang 1** beifügt ist.

Der Leitfaden zu genehmigungsrechtlichen Anforderungen für den Deponierückbau ergänzt diesen Leitfaden zum Deponierückbau. Wesentliche Inhalte des rechtlichen Leitfadens werden in diesem Kapitel wiedergegeben.

Nachfolgend werden die Rechtsgebiete aufgezeigt, die maßgeblich für den Rückbau in Frage kommen:

Für den eigentlichen **Rückbau** sind **2 Rechtsgebiete** maßgeblich:

- Abfallrecht

oder

- Bodenschutzrecht.

Die dann weiterhin erforderlichen Anlagen zur Lagerung oder Behandlung von Abfällen werden geregelt durch das Bundes-Immissionsschutzgesetz.

Deponien unterliegen grundsätzlich dem Abfallrecht:

*Wenn der Betreiber einer Deponie aus der Nachsorgepflicht entlassen wurde, d. h. nach dem Ende der Nachsorgephase, fallen Deponien als Altablagerungen unter das Bodenschutzrecht.*

**Der Rückbau einer Deponie zum Zwecke der Wiedergewinnung von Rohstoffen in der Stilllegungs- oder Nachsorgephase (§ 40 KrWG) oder nach dem Ende der Nachsorgephase ist bislang weder im Abfallrecht noch im Bodenschutzrecht ausdrücklich vorgesehen** (Sanden, Schomerus 2012).

### Abfallrecht

- EG-Deponierichtlinie (1993/31)
  - Hier sind keine ausdrücklichen Regelungen zum Rückbau enthalten. Nur Stilllegung und Nachsorge werden geregelt.
- Kreislaufwirtschaftsgesetz –KrWG
  - vom 24.02.2012 regelt im Wesentlichen:
    - Zulassung von Deponien;
    - Errichtung, Bau und Betrieb sowie wesentliche Änderungen einer Deponie bedürfen grundsätzlich der Planfeststellung mit einer durchzuführenden Umweltverträglichkeitsprüfung, § 35 Abs. 2 KrWG;
    - Stilllegung und Nachsorge nach § 40 KrWG.
- Deponieverordnung –DepV
  - vom 27.04.2009 in der Fassung der 2. Änderung vom 15.04.2013 regelt im Wesentlichen:
    - Umsetzung EU-Vorgaben;
    - Umsetzung KrWG;
    - rechtlichen Vorgaben für Deponien, die sich vor allem an den Deponiebetreiber wenden, werden weiter konkretisiert.

### **Anforderungen der Deponieverordnung gelten jedoch nicht für Deponien und Deponieabschnitte:**

- auf denen die Stilllegungsphase vor dem 01. Januar 1997 begonnen hat,
- auf denen die Stilllegungsphase vor dem 16. Juli 2001 begonnen hat und für die zu diesem Zeitpunkt auch Festlegungen für die Stilllegung getroffen waren (Planfeststellung, Plangenehmigung, Anordnung),

– die am 16. Juli 2009 durch bestandskräftigen Bescheid endgültig stillgelegt waren. Diese Deponien unterliegen aber weiterhin dem Abfallrecht.

### **Der Deponierückbau, der vor dem Abschluss der Nachsorgephase beginnt, unterliegt dem Abfall- bzw. Deponierecht.**

Inhaltliche Vorgaben an den Deponiebetreiber für die Stilllegungs- und Nachsorgephase werden in §§ 10 und 11 DepV geregelt. Hierin gibt es keine expliziten Regelungen für den Deponierückbau.

In § 6 Abs. 6 Satz 2 Nr. 2 DepV werden konkrete Vorgaben für Abfälle gemacht, die aus dem Rückbau einer Deponie oder einer Altlast stammen und abgelagert werden sollen.

Und im Anhang 5 Ziffer 10 Nr. 6 DepV ist der Rückbau als ein Kriterium für das Ende der Nachsorgephase angeführt.

### Bodenschutzrecht

Nach dem Ende der Nachsorgephase unterliegt die Deponie **nicht mehr dem Abfallrecht**, sondern **dem Bodenschutzrecht**, das dann für eventuelle Anordnungen der zuständigen Behörde herangezogen werden kann. § 40 Abs. 2 Satz 2 KrWG verweist hierzu auf die Vorschriften des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG).

Altablagerungen im Sinne des § 2 Abs. 5 Nr. 1 BBodSchG sind stillgelegte Abfallbeseitigungsanlagen sowie sonstige Grundstücke, auf denen Abfälle behandelt, gelagert oder abgelagert worden sind.

Wenn eine Altablagerung aufgrund der Gefahrenabwehr zurückgebaut werden muss, dann ist dies eine Altlastensanierung, die durch eine Verfügung nach § 4 Abs. 3 BBodSchG und einen Sanierungsplan nach § 13 BBodSchG zu regeln ist.

Das Bodenschutzrecht regelt aber nur Fragen der Gefahrenabwehr und keine Fragen der Rohstoffrückgewinnung, die dann i. d. R. beim Deponierückbau relevant sind. Für die Anordnung eines Deponierückbaus ohne Gefahrentatbestand stellt das Bodenschutzrecht keine hinreichende Rechtsgrundlage dar.

**Es steht einem Deponierückbau, der dann nach dem Abfallrecht zu genehmigen wäre, aber auch nicht entgegen.**

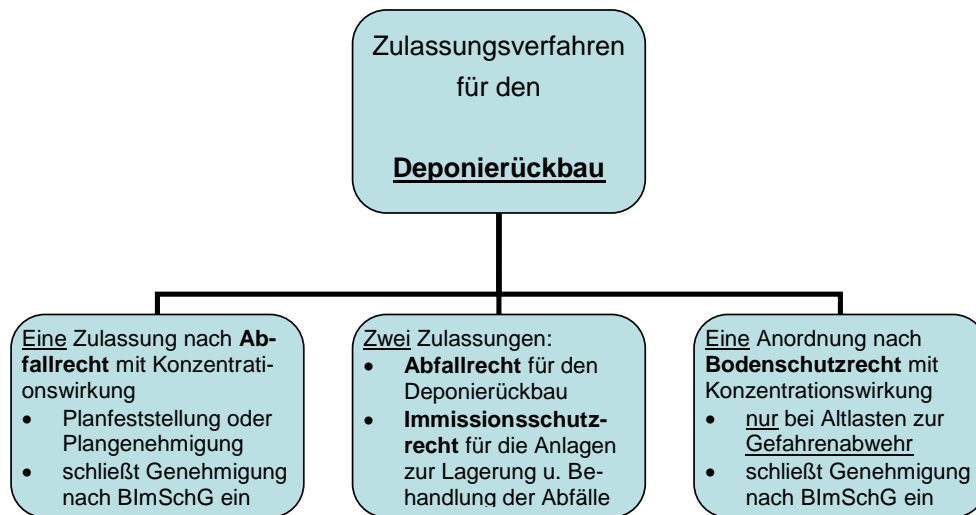
### **Bergrecht**

Im Bundesberggesetz geht es um das Aufsuchen, Gewinnen und Aufbereiten von Bodenschätzen. Dem Begriff der Bodenschätze (§ 3 Abs. 1 BBergG) unterliegen aber nur Rohstoffe, die in natürlichen Lagerstätten vorkommen.

Abfälle einer Deponie erfüllen dieses Kriterium nicht, so dass die Anwendbarkeit des Bergrechts ausscheidet (Sanden, Schomerus 2012).

### **Zulassungsverfahren**

Der Deponierückbau oder teilweise Rückbau einer Deponie bedarf eines Zulassungsverfahrens, das formal und inhaltlich dem jeweiligen zu Grunde liegenden Rechtsgebiet angepasst sein muss (Abbildung 2-1).



**Abbildung 2-1:** Zulassungsverfahren für den Deponierückbau

**Planfeststellungsverfahren nach § 35 Abs. 2 KrWG** mit Umweltverträglichkeitsprüfung (Ablauf gem. Verwaltungsverfahrensgesetz)

oder

**Plangenehmigung nach § 35 Abs. 3 KrWG** kann die zuständige Behörde erteilen, wenn

die Errichtung und der Betrieb einer unbedeutenden Deponie beantragt werden,

oder

eine 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 (UVP) genanntes Schutzgut haben kann,

oder

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 2 Jahren nach Inbetriebnahme der Anlage erteilt werden soll (bei gefährlichen Abfällen höchstens 1 Jahr).

Die zuständige Behörde soll ein Plangenehmigungsverfahren durchführen, wenn die wesentliche Änderung keine erheblichen nachteiligen Auswirkungen auf ein Schutzgut hat und den Zweck verfolgt, eine wesentliche Verbesserung für diese Schutzgüter herbeizuführen.

Einschränkungen hinsichtlich der Durchführungen eines Plangenehmigungsverfahrens anstelle eines Planfeststellungsverfahrens nach § 35 Abs. 2 Satz 2 beziehen sich auf die Errichtung und den Betrieb von Deponien und nicht auf die wesentliche Änderung.

Gemäß § 36 Abs. 1 KrWG darf ein Planfeststellungsbeschluss oder eine Plangenehmigung nur erteilt werden, wenn sichergestellt ist, dass das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird, insbesondere keine Gefahren für die Schutzgüter, wie z. B. die Gesundheit der Menschen, Gewässer und Boden, Tiere und Pflanzen, hervorgeru-

fen werden können. Schädliche Umweltverunreinigungen durch Luftverunreinigungen oder Lärm sind zu vermeiden.

Im Gesetz zur Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) werden in § 2 Abs. 1 Satz 2 die Schutzgüter wie folgt konkretisiert: Menschen, Tiere und Pflanzen, biologische Vielfalt, Boden, Wasser, Luft, Klima und Landschaft, Kultur- und sonstige Sachgüter, einschließlich der jeweiligen Wechselwirkungen zwischen diesen Schutzgütern.

### **Zweck des Vorhabens: Verbesserung der Schutzgüter**

Deponierückbau kann als Zweck der Maßnahme auch die Beseitigung oder Verringerung von Grundwasserbelastungen oder Gasemissionen haben.

Wenn die Rückbaumaßnahme im Zielzustand eine wesentliche Verbesserung der Situation für die Schutzgüter nach UVPG herbeiführt, liegt eine wesentliche Voraussetzung für die Durchführung eines Plangenehmigungsverfahrens anstatt eines Planfeststellungsverfahrens vor, auch wenn der Rückbau selbst für einige Jahre Auswirkungen auf die Schutzgüter haben kann.

### **Zweck des Vorhabens: Ressourcenrückgewinnung**

Ressourcenrückgewinnung bzw. Ressourcenschutz ist als Zweck des Rückbaus nicht im KrWG verankert.

Dies ist somit kein Grund für die Durchführung eines Plangenehmigungsverfahrens.

Die Entscheidung der zuständigen Behörde, ob ein Planfeststellungs- oder Plangenehmigungsverfahren durchzuführen ist, ist allein aufgrund der zu erwartenden Auswirkungen des Deponierückbaus zu treffen.

Der Deponierückbau kann auch viele Jahre dauern und wieder neue erhebliche Emissionen hervorrufen und Auswirkungen auf die Schutzgüter haben. In diesem Fall soll dann die zuständige Behörde i.d.R. ein Planfeststellungsverfahren mit UVP durchführen.

- Die zuständige Behörde hat im Planfeststellungs- und Plangenehmigungsverfahren die Auswirkungen auf die Schutzgüter zu prüfen und abzuwägen. Wenn das Vorhaben genehmigungsfähig ist, dann sind diese Auswirkungen durch technische Maßnahmen zu minimieren und als Auflagen im Genehmigungsbescheid zu regeln.

### **Anzeige nach § 35 Abs. 4 und 5 KrWG, wenn**

- keine wesentliche Änderung der Deponie erfolgt und
- keine nachteiligen Auswirkungen zu erwarten sind.

Für den Rückbau einer Deponie oder Teilen der Deponie ist ein Anzeigeverfahren nicht ausreichend.

### **Arbeitsschutz**

Beim Deponierückbau treten für die Beschäftigten erhebliche Gefährdungen unterschiedlichster Art auf. Diese können z. B. von den eingesetzten technischen Arbeitsmitteln, von vorhandenen Gefahrstoffen oder von biologischen Arbeitsstoffen ausgehen.

Auf diese Gefährdungen ist geeignet zu reagieren. Entsprechende Schritte sind vor Beginn der Arbeiten und während der Arbeiten durchzuführen.

Grundlage ist das Arbeitsschutzgesetz und die daraus resultierenden Verordnungen, hier insbesondere die Gefahrstoffverordnung und die Baustellenverordnung.

Ein wesentliches Instrument ist hierbei die Gefährdungsbeurteilung. Im Zusammenhang mit dem Rückbau von Deponien besteht die Gefährdungsbeurteilung aus dem Sicherheits- und Gesundheitsschutzplan (SiGe-Plan) gemäß Baustellenverordnung, in dem der Arbeits- und Sicherheitsplan gemäß Gefahrstoffverordnung als wesentlicher Bestandteil enthalten ist.

### **Wesentliche Gesetze und Verordnungen**

- Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG
- Biostoffverordnung – BioStoffV
- Gefahrstoffverordnung – GefStoffV
- Baustellenverordnung – BaustellV

### **Wesentliche Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS)**

- TRGS 524 – Technische Regeln für Gefahrstoffe, Schutzmaßnahmen bei Tätigkeiten in kontaminierten Bereichen

### **Wesentliche Vorschriften und Regeln der Unfallversicherungsträger / Berufsgenossenschaft**

- BGR 127 / GUV-R 127 – Regeln für Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit auf und in Deponien
- BGR 128 – Kontaminierte Bereiche

### Pflichten des Auftraggebers

Der Auftraggeber hat nach Baustellenverordnung die Pflicht, einen Arbeits- und Sicherheitsplan von einer fachkundigen Person erstellen und dokumentieren zu lassen. Dieser wird dem Auftragnehmer übergeben, damit er seinen Arbeitsschutzpflichten als Arbeitgeber nachkommen kann.

### Pflichten des Auftragnehmers

Der Auftragnehmer, der die Arbeit ausführt, legt vor Aufnahme der Tätigkeit auf der Grundlage der vom Auftraggeber erstellten Dokumentation die unternehmensspezifischen technischen, organisatorischen und persönlichen Schutzmaßnahmen einschließlich eines Konzeptes zur Kontrolle der Einhaltung der Maßnahmen in seiner Gefährdungsbeurteilung fest.

Hierbei hat er insbesondere die arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchungen, Unterweisungen, Betriebsanweisungen und die sich daraus ergebende konkrete persönliche Schutzausrüstung sowie die fachkundige Bauleitung und Aufsicht festzulegen.

### Genehmigungs- und Anzeigeverfahren nach BImSchG für Anlagen zur Lagerung oder Behandlung von Abfällen

Der beim Deponierückbau abgegrabene Abfall gelangt anschließend in Anlagen zur Lagerung und Behandlung von Abfällen, für die ein Genehmigungsverfahren nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) erforderlich sein kann. Entweder diese Genehmigungen werden im Rahmen der Konzentrationswirkung des abfallrechtlichen Planfeststellungs- oder Plangenehmigungsverfahrens für den Deponierückbau ebenfalls erteilt (was die Regel ist) oder es wird ein gesondertes Verfahren nach dem BImSchG durchgeführt, wenn die Anlage keinen betriebstechnischen Zusammenhang zur Deponie hat.

Die Art des Verfahrens, d. h. ob gemäß § 10 BImSchG ein Genehmigungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung oder ein vereinfachtes Verfahren nach § 19 BImSchG (ohne Auslegung des Antrags und Erörterungstermin) durchzuführen ist, hängt von der Größe der Anlage und von der Art der Abfälle ab. Dies ist in der 4. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (4. BImSchV) geregelt:

- V = Vereinfachtes Verfahren
- G = Verfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung

### Anordnungen (Sanierungsplan) nach BBodSchG

Unterliegt die Deponie als Altlast (Altablagerung) dem Bodenschutzrecht (siehe S. 24), kann ein (ggf. vollständiger) Deponierückbau im Rahmen der Gefahrenabwehr erfolgen. Wenn die abschließende Gefährdungsabschätzung zur Altlast ergibt, dass Sanierungsmaßnahmen notwendig sind, wird die Durchführung einer Sanierungsuntersuchung und die Vorlage eines Sanierungsplans (§ 13 BBodSchG) notwendig.

Gemäß § 13 Abs. 1 BBodSchG soll die zuständige Behörde bei Altlasten, von denen in besonderem Maße schädliche Bodenveränderungen oder sonstige Gefahren für den Einzelnen oder die Allgemeinheit ausgehen, von einem zur Sanierung Verpflichteten die notwendigen Sanierungsuntersuchungen und die Vorlage eines Sanierungsplans verlangen.

Die Anforderungen an eine Sanierungsuntersuchung und einen Sanierungsplan ergeben sich aus § 6 und Anhang 3 BBodSchV.

### **Rechtliche Vorgaben für den Wiedereinbau**

#### Abfallrecht

Wenn bei einem Deponierückbau ein Teil der Abfälle nicht verwertet werden kann, sind diese Abfälle dann ordnungsgemäß zu entsorgen. Neben einer Entsorgung in einer anderen Entsorgungsanlage (z. B. Müllverbrennungsanlage, Mechanisch-Biologische Behandlungsanlage, andere Deponie), besteht ggf. bei einem teilweisen Deponierückbau auch die Möglichkeit, den Abfall auf derselben Deponie wieder abzulagern. **Für den Wiedereinbau gelten die aktuellen Vorgaben der Deponieverordnung.**

In § 6 in Verbindung mit Anhang 3 DepV sind die Voraussetzungen für die Ablagerung auf einer Deponie geregelt. Danach gibt es für Abfälle, die aus dem Rückbau einer Deponie oder Altlast stammen, besondere Regelungen (§ 6 Abs. 6 Satz 2 Nr. 2 DepV). Diese Abfälle dürfen, mit Zustimmung der zuständigen Behörde, auch bei Überschreitung einzelner Zuordnungswerte, insbesondere des TOC und des Glühverlustes, abge-



lagert werden, soweit vorher eine möglichst weitgehende Aussortierung organischer Anteile erfolgt, die heizwertreichen Abfallanteile vor der Ablagerung weitgehend abgetrennt werden und das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird.

### Bodenschutzrecht

Bei einer Altlastensanierung kann im Rahmen des Sanierungsplans und innerhalb der Fläche des Sanierungsplans Bodenmaterial umgelagert bzw. wiedereingebaut werden.

Gemäß § 13 Abs. 5 BBodSchG entfällt bei entnommenem Bodenmaterial, das im Bereich der von der Altlastensanierung betroffenen Fläche wieder eingebracht werden soll, der Anlagenbenutzungszwang des § 28 Abs. 1 KrWG, wenn durch einen für verbindlich erklärten Sanierungsplan oder eine Anordnung sichergestellt ist, dass das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird.

### **Sicherheitsleistung, Rückstellung, Gebühren**

Hierzu ist wesentlich, dass nach Entscheidung des OVG Münster (U. v. 24.11.1999 -9 A 5913/96) Nachsorgekosten, die über Abfallentsorgungsgebühren gedeckt sind, zum Deponierückbau verwendet werden können, wenn es zur Reduzierung der Kosten dient.

### **Empfehlungen für künftige rechtliche Regelungen**

#### KrWG

- **§ 40 KrWG Stilllegung:** Hier sollte der Deponierückbau verankert werden.
- **§ 35 Abs. 2 KrWG Planfeststellungsverfahren z. B. ergänzen:**

*„Die Errichtung und der Betrieb von Deponien, der Deponierückbau sowie die wesentliche Änderung einer solchen Anlage oder ihres Betriebes bedürfen der Planfeststellung durch die zuständige Behörde.“*
- **§ 35 Abs. 3 KrWG Plangenehmigungsverfahren**

Satz 1, Nr. 3:  
*Ergänzung des Deponierückbaus (Erprobung neuer Verfahren)*  
Satz 2: *ggf. Ergänzung der Ressourcenrückgewinnung bzw. des Ressourcenschutzes als weiterer Zweck zur Durchführung eines Plangenehmigungsverfahrens (neben dem Zweck wesentliche Verbesserung für die Schutzgüter).*

#### Deponieverordnung

- **§ 1 Abs. 1 Nr. 1 DepV;** Anwendungsbereich erweitern

*„Diese Verordnung gilt für  
1. die Errichtung, den Betrieb, die Stilllegung, Nachsorge und Rückbau von Deponien, ...“*
- **§ 2 DepV;** Begriffsbestimmungen ergänzen

*„Deponierückbau:  
Abgrabung der auf einer Deponie abgelagerten Abfälle, entweder der gesamten Deponie oder einzelner Deponieabschnitte“*

- einen neuen § 11 a DepV „Deponierückbau“ einfügen

*Zweck des Deponierückbaus ist die Ressourcenrückgewinnung oder die Verbesserung der Schutzgüter.*

**Ausführliche Informationen sind in der Anlage „Zulassungsrechtliche Anforderungen für den Deponierückbau – Leitfaden“ enthalten.**

## **2.2. Abfallwirtschaftliche Aspekte**

Entscheidend für die Durchführung eines Deponierückbaus ist die Bestandsaufnahme des Deponiekörpers. Nur nach einer Abschätzung des Deponieinventars und der Anteile an recycelbaren Wertstoffen können die technische Umsetzung, die Wirtschaftlichkeit sowie Einflüsse auf die Umwelt ermittelt werden.

Erste zu ermittelnde Kenngröße ist der Zeitraum der Abfallablagerung, da dieser maßgeblichen Einfluss auf die Güte der Daten bezüglich der Abfallmassen und -zusammensetzungen hat. Beide Größen werden durch die Bevölkerungs-, Industrie- und Gewerbestruktur des Entsorgungsgebietes beeinflusst. Änderungen über die Zeit ergeben sich zum einen durch gesetzliche Vorgaben (Getrennsammelsysteme, Recyclingquoten etc.) und zum anderen durch lokale und/oder überregionale wirtschaftliche Einflüsse. Dies führt dazu, dass Deponien untereinander nur wenig vergleichbar sind und es auch innerhalb einer einzelnen Deponie-Abschnitte geben kann, die ein unterschiedliches Wertstoffpotenzial aufweisen (Wiemer et al. 2009).

Deponien, die vor dem Inkrafttreten des bundesweiten Abfallgesetzes 1972 betrieben wurden, sind gekennzeichnet durch eine ungeordnete Ablagerung der Abfälle. Eine Erfassung und Kontrolle der Abfälle war gesetzlich nicht geregelt und fand daher i. d. R. nicht statt, Hausmüll und Sonderabfälle wurden vielfach gemeinsam abgelagert. Eine Verwiegung der Abfälle bei der Anlieferung erfolgte auch in den Folgejahren nach 1972 i. d. R. nicht. Anstelle der Masse wurde häufig nur das Abfallvolumen geschätzt, auch spezifische Abfallzusammensetzungen wurden nicht ermittelt. Bei diesen Altdeponien muss auf der Grundlage des Betriebszeitraumes der Deponie und der wirtschaftlichen Struktur des Einzugsgebiets die mögliche Abfallzusammensetzung und das Vorhandensein von Industrieabfällen abgeschätzt werden. Die erste Bundesweite Hausmüllanalyse (BHMA) erfolgte erst 1979/1980, aber auch lokale Abfallanalysen aus diesem Zeitraum liegen kaum vor. Eine unmittelbare Massenermittlung einzelner Abfallarten ist damit nicht möglich. Die Annahme, dass in diesen alten Deponien das Wertstoffpotenzial höher ist als in jüngeren Deponien, weil es keine Getrennterfassung von Wertstoffen gab (z. B. Bockreis, Knapp 2011), muss nicht zutreffend sein, da in der Vergangenheit z. B. Metalle an der Deponie angeliefert und eventuell erfasst, aber nicht abgelagert, sondern einer Verwertung zugeführt wurden. Zudem war in den 1950er, 60er und 70er Jahren des letzten Jahrhunderts das Bewusstsein in der Bevölkerung hinsichtlich der Werthaltigkeit insbesondere metallischer Wertstoffe deutlich höher als heute, sodass größere Metallteile häufig nicht in den Restmüll gegeben, sondern selbst einer Verwertung zugeführt wurden. Bei diesen Altdeponien ist zudem zu berücksichtigen, dass der Anteil an Kunststoffen im Vergleich zu den Jahren ab ca. 1980 deutlich geringer ist, während der Ascheanteil, u. a. wegen der deutlich höheren Anzahl der damals betriebenen Kohlefeuerungen, noch deutlich erhöht ist. Diese Situation ergibt sich auch bei Deponien in den Neuen Bundesländern, auf denen Abfälle vor 1990 abgelagert wurden.

Durch eine intensive Befragung des Betriebspersonals sowie der in der Umgebung lebenden Bevölkerung können z. B. Hinweise zum Betrieb oder zu besonderen Ablagerungsbereichen erhalten werden. Durch die Ermittlung der Kubatur des Deponiekörpers kann bei Deponien, die oberhalb der Geländeoberkante aufgebaut wurden, unter Einbeziehung der Einbaudichte der Abfälle (häufiger Wertebereich:  $0,7 - 1,4 \text{ t/m}^3$  Feuchtsubstanz) die Abfallmasse grob abgeschätzt werden. Bei Grubendeponien ist der Aufwand zur Volumenermittlung häufig deutlich größer, da vielfach die Tiefenlage der Deponiebasis nicht bekannt ist. Sie kann jedoch mit geotechnischen Messverfahren ermittelt werden. Durch eine Auswertung von Daten zu den Sickerwasserqualitäten und den Gasemissionen können Hinweise auf den Abbaugrad der abgelagerten biologisch abbaubaren Substanzen sowie auf Inhaltsstoffe, die nach der Ablagerung von Industrie- und Sonderabfällen freigesetzt werden, gewonnen werden. Auf der Auswertung der vorhandenen Unterlagen aufbauend, sollten Untersuchungen am Deponiekörper durchgeführt werden, um diesen besser beschreiben zu können (s. unten).

Bei Deponien jüngeren Datums ergibt sich in Bezug auf die abgelagerten Massen ein deutlich besseres Bild. Mit dem Erlass der TA Siedlungsabfall im Jahr 1993 mussten die Abfälle verwogen und die Abfallart (Abfallschlüsselnummer) ermittelt werden. Eine bessere Abschätzung des theoretischen, d. h. des sich auf der Grundlage der Datenerhebung ergebenden Wertstoffpotenzials, ist damit möglich. In Bezug auf die Zusammensetzung der Abfälle kann für Deponien, die im Zeitraum von ca. 1975 – 1985 betrieben wurden, eine erste Abschätzung mit Hilfe von Daten der BHMA aus den Jahren 1978/80 und 1985 (Barghoorn 1981; Barghoorn et al. 1986) erfolgen. Bei den Daten muss berücksichtigt werden, dass nicht alle auf Deponien angelieferten Abfälle berücksichtigt wurden, Sperrmüll und Abfälle aus Kleinbetrieben (Geschäfte, Handwerk etc.) sind nicht enthalten. Zudem liegen innerhalb von Deutschland erhebliche Unterschiede in der Wirtschaftsstruktur (städtische geprägte Bereiche im Vergleich zum ländlichen Raum, Industriegebiete im Vergleich zu Agrargebieten, Art und Entwicklung der Industrie, der Gewerbe etc.) vor, die sich unmittelbar auf die Abfallzusammensetzung auswirken, so dass die BHMA nur eine grobe Abschätzung der einzelnen Abfallfraktionen erlaubt. Eine Übertragbarkeit von Hausmüllanalysen auf andere Gebiete ist auch insofern problematisch, da es bisher in Deutschland keine einheitliche Vorgehensweise bei der Durchführung einer Hausmüllanalyse gibt. Gerade bei älteren Analysen unterscheiden sich häufig die ermittelten Einzelfraktionen oder auch die gewählte Bezugsgröße (Masse oder Volumen des Abfalls). Eine lokale Hausmüllanalyse, die bei längeren Betriebszeiträumen der Deponie wiederholt wurde, kann hingegen eine gute Abschätzung der Potenziale liefern.

In einer Datenbank wurden durch Nispel (2012) 150 deutsche Hausmüllsortieranalysen statistisch ausgewertet. Mittels einer linearen Regression wurde ein Zusammenhang zwischen dem Zeitpunkt der Analyse sowie den Gehalten einzelner Wertstoffe hergestellt. Für eine erste grobe Abschätzung der Potenziale können die erstellten Diagramme eine Hilfestellung darstellen. Problematisch bei dieser Auswertung ist, dass kein linearer statistischer Zusammenhang zwischen dem Jahr der Analyse und der Abfallzusammensetzung bestehen muss, dies wird auch durch das teilweise sehr geringe Bestimmtheitsmaß unterstrichen. Als Grund hierfür sind regional variierende abfallwirtschaftliche Rahmenbedingungen zu nennen. Beispielsweise erfolgte die Umsetzung der Getrenntsammlung bestimmter Stoffe in den einzelnen Regionen zu unterschiedlichen Zeitpunkten, oder aber die wirtschaftliche Situation hat sich unterschiedlich entwickelt bzw. verändert. Zudem sind bei den Berechnungen Gewerbeabfälle und Sperrmüll nicht berücksichtigt. Zusammenfassend zeigt sich, dass die Analysen zu

Wertstoffpotenzialen nicht übertragbar sind, sie können aber qualitativ aufzeigen, mit welchen Wertstoffpotenzialen eventuell gerechnet werden kann (Wiemer et al. 2009).

In Ergänzung zu der Auswertung der vorhandenen Daten können Untersuchungen am Deponiekörper selbst erforderlich sein, um detailliertere Informationen in Hinblick auf folgende Punkte zu erhalten:

- Abfallzusammensetzung: Abfallarten und -schichtungen, Abbaugrad, Monoablagebereiche, mineralische Zwischenabdichtungen, Sonderabfälle etc.
- Konkretisierung der zu treffenden Arbeitsschutzmaßnahmen: Gasemissionen (Deponiegas und toxische Gase), Sickerwassereinstau (Quantität und Qualität).

Diese Untersuchungen am Deponiekörper sollten daher grundsätzlich immer bei Deponien durchgeführt werden, bei denen die Datenlage zu den abgelagerten Abfällen mangelhaft ist.

Zur Erkundung können entweder Probebohrungen (i. d. R. Schnecken- bzw. Greiferbohrungen) niedergebracht oder Probeschürfe hergestellt werden (s. Abbildung 2-2). Aufgrund der stark ausgeprägten Heterogenität eines Deponiekörpers ist die Gewinnung von Feststoffproben, die repräsentativ für den gesamten Deponiekörper sind, problematisch. Für eine gesicherte Aussage zur Abfallzusammensetzung und zum vorhandenen Gefährdungspotenzial wäre in Abhängigkeit von der Größe der Deponie eine große Anzahl an Probenahmestellen erforderlich, was aus Kostengründen i. d. R. nicht möglich ist. Die Erfahrungen mit einer rasterförmigen Anordnung von Bohrpunkten auf Deponieflächen (Raster 50 \* 50 bzw. bis zu 100 m) zeigen, dass eine allgemeingültige Empfehlung über die Mindestanzahl von niederzubringenden Bohrungen aufgrund der Heterogenität des Deponiekörpers nicht angegeben werden kann (Sormunen et al. 2008). Aufbauend auf den Daten - sofern vorhanden - zur Belegung der Deponiefläche mit einzelnen Abfällen über den Betriebszeitraum können die Untersuchungspunkte festgelegt werden. Erfasst werden müssen u. a. Bereiche, die sich aufgrund des Alters der dort abgelagerten Abfälle unterscheiden und Bereiche, in denen Monochargen bzw. Abfälle, die ein erhöhtes Gefährdungspotenzial aufweisen können, abgelagert wurden. Die Bohrungen sollten bis zur Deponiebasis niedergebracht werden, da nur so ein Gesamtprofil der Abfallzusammensetzung erstellt und ein Sickerwassereinstau im Basisbereich ermittelt werden kann. Bei Vorhandensein eines Sickerwassereinstaus sollten aus diesem Bereich Proben entnommen werden, da dort die Randbedingungen für eine Stabilisierung der Abfälle besonders vorteilhaft sind.



**Abbildung 2-2:** Schneckenbohrung, Greiferbohrung und Großschurf in Hausmülldeponien

Die Schneckenbohrungen (Durchmesser ca. 100 – 2000 mm) können unverrohrt bzw. verrohrt niedergebracht werden. Eine Verrohrung ist vorzusehen, wenn die Standsicherheit des Bohrloches nicht gewährleistet ist (z. B. hoher Anteil an feinteiligen, nichtbindigen Materialien oder im Bereich eines Sickerwassereinstaus). Schneckenbohrungen sind die am häufigsten eingesetzten Bohrverfahren im Deponiebereich, da sie relativ schnell niedergebracht werden können und relativ geringe Kosten verursachen. Erst bei größeren Deponiehöhen (über 20 – 25 m) wird das Bohrverfahren zeitlich aufwändig, so dass dann häufig Greiferbohrungen (Durchmesser 400 – 1.500 mm) eingesetzt werden. Diese Bohrungen werden immer verrohrt ausgeführt, um eine vertikale Führung des Greifers im Deponiekörper sicherzustellen. Mit beiden Bohrverfahren können gemäß DIN EN 1997-2 nur Proben der Güteklasse 3 – 4 entnommen werden (Probe enthält alle Bestandteile des Abfalls und behält den natürlichen Wassergehalt. Die allgemeine Anordnung der verschiedenen Schichten oder der Bestandteile des Abfalls kann bestimmt werden. Die Struktur des Abfalls wurde gestört). Eine Ausnahme stellen Greiferbohrungen im Sickerwasserbereich dar, die nur eine Entnahme von Proben der Güteklasse 5 ermöglichen (die Struktur des Abfalls wird völlig verändert, Schichtungen können nicht erkannt werden, der Wassergehalt ist nicht repräsentativ für den natürlichen Wassergehalt der Abfallsschicht). Es muss besonders bei geringeren Bohrdurchmessern berücksichtigt werden, dass die für eine Sortieranalyse entnommene Probenmasse u. U. sehr klein ist, so dass die Aussagekraft der Analyse entsprechend gering ist. An den Feststoffproben können der Wassergehalt, die Schichtenfolge, die groben Schichtgrenzen und die Materialdichte bestimmt werden. Bei der ebenfalls ermittelbaren Stückgrößenverteilung ist zu beachten, dass insbesondere bei einer Schneckenbohrung mit kleinem Durchmesser durch den Bohrvorgang vor allem Grobmaterial zerkleinert werden kann, so dass u. U. ein zu hoher Anteil an kleinstückigem Material bestimmt wird. Mit Schneckenbohrungen kann gemäß DIN EN 1997-2 jedoch nicht die Lagerungsdichte ermittelt werden. Während des Bohrens ist das gewonnene Abfallmaterial gemäß dem Bohrfortschritt als Profil abzulegen. Die wesentlichen Abfallarten, auffällige Schichtungen, Feuchtegehalt, Färbung und Geruch sind zu beschreiben. Im Bohrloch selbst sollten in verschiedenen Tiefen die Gaszusammensetzung, die Temperatur und ein eventuell vorhandener Sickerwassereinstau gemessen werden. Bei einem Sickerwassereinstau sollten Wasserproben für die Laboranalytik entnommen werden. Zusätzlich müssen am Bohrloch Messungen zu den Staubemissionen durchgeführt werden.

Gegenüber Bohrungen weisen Schürfe den Vorteil auf, dass größere Abfallmengen beprobt werden können und auch die Schichtungen des Abfallkörpers besser erkennbar sind. Nachteil ist, dass durch das Freilegen größerer Abfallflächen verstärkt Gase freigesetzt werden und damit eine Begehung des Schürfes eventuell nur mit zusätzlichen Schutzmaßnahmen möglich ist. Dies ist insbesondere bei Schürfen im Plateaubereich zu beachten, bei denen der Luftaustausch schlechter ist als bei Schürfen im Böschungsbereich. Ein weiterer Vorteil des Anlegens von Schürfen an den Böschungen ist, dass sie bis zur Basis der Deponie reichen können, wobei beim Antreffen von Sickerwasser beachtet werden muss, dass dann die Standsicherheit, die i. d. R. auch bei vertikalen Wänden gegeben ist, stark verringert sein kann. Ein entsprechender rechnerischer Nachweis ist bei tiefen, zu begehenden Schürfen zu führen. Während des Anlegens des Schurfs sind Emissionsmessungen entsprechend der Vorgehensweise bei den Bohrungen durchzuführen. Auch die Probennahme erfolgt nach den gleichen Kriterien wie bei den Bohrungen.

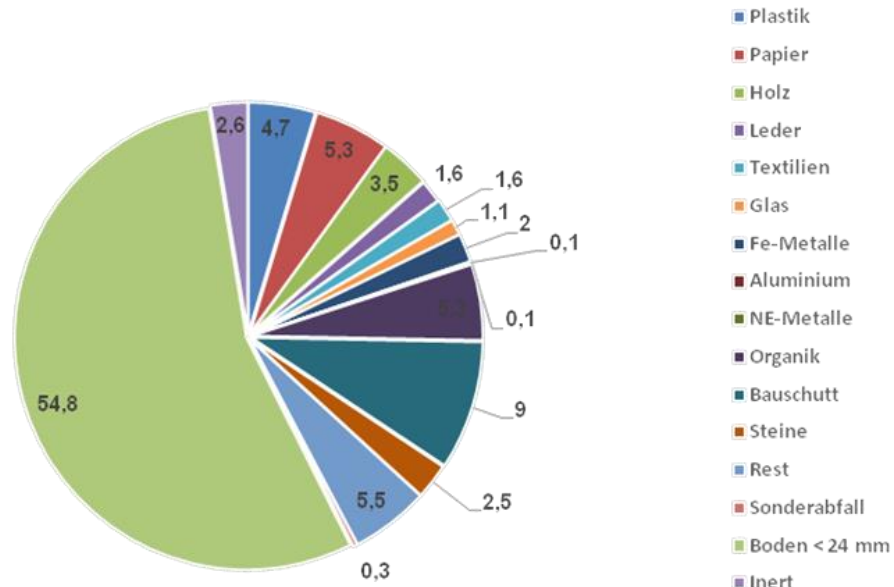
Die Feststoffproben für die Sortieranalysen sowie die chemischen und physikalischen Analysen können entweder als Mischprobe über die gesamte Höhe oder aus einzelnen Schichten entsprechend der Höhenlage bzw. dem Schichtenaufbau entnommen werden.

Die stoffliche Zusammensetzung der Abfälle ist von besonderer Bedeutung, wenn die darin enthaltenen Wertstoffe einer neuerlichen Verwertung zugeführt werden sollen. In der Tabelle 2-1 sind die wesentlichen Stoffströme sowie deren mögliche Verwertung aufgetragen.

**Tabelle 2-1:** Verwertung verschiedener Stoffgruppen (ergänzt nach Hölzle 2010)

Stoffgruppe	Verwertung
Grobmineralik	RC-Baustoff im Straßen- und Wegebau, Deponiebaumaßnahmen
Feinmineralik	Deponiebaumaßnahmen, RC Baustoffe
Kunststoffe, Textilien, Papier, Gummi, Holz etc.	Energetische Verwertung
Kunststoffe	Stoffliche Verwertung
Reifen	energetische und stoffliche Verwertung, v.a. in der Zementindustrie (Erläuterung: das in den Reifen enthaltene Metall – Karkasse – ist eine wichtige stoffliche Komponente in der Zementindustrie)
Metalle	Stoffliche Verwertung
Organik	Biogasherstellung
Glas	Stoffliche Verwertung, Deponiebaumaßnahmen

In Abbildung 2-3 sind die im Rahmen von 60 internationalen Deponierückbauprojekten ermittelten Anteile der einzelnen Abfallfraktionen dargestellt.



**Abbildung 2-3:** Aus 60 Rückbauprojekten berechnete Abfallzusammensetzung [M.-%] (nach van Vossen, Prent 2011)

Die Werte zeigen, dass in Bezug auf die Masse der Anteil an Boden < 24 mm den größten Anteil einnimmt. Dieses Bodenmaterial dürfte in der Regel durch den Kontakt mit den Abfällen, dem Sickerwasser oder den Deponiegasen mit Schadstoffen belastet sein bzw. stellt den Rückstand aus den Stoffumwandlungsprozessen im Deponiekörper dar, so dass es entweder weiter aufbereitet oder erneut auf einer Deponie abgelagert werden muss. Zusammen mit den übrigen Inertstoffen ergibt sich ein Massenanteil von ca. 76 %, der in der Vergangenheit i. d. R. ohne weitere Behandlung auf Deponien erneut abgelagert wurde.

Die heizwertreiche Fraktion (Plastik, Papier, Holz, Leder, Textilien) kann aufgrund ihres Energiegehaltes eine wirtschaftlich besonders wichtige Fraktion darstellen. In der Massenbilanz ist sie mit ca. 22 M.-% die zweitgrößte Fraktion. Die Brennwerte liegen häufig im Bereich von ca. 7.000 – 22.000 MJ/t. Gegenüber frischen Abfällen muss beachtet werden, dass diese Fraktion häufig durch mineralische Feinanteile verschmutzt ist, so dass teilweise über 20 M.-% als Verbrennungsrückstand bzw. Asche anfallen (DWA 2012). Zudem ist nicht sichergestellt, dass bei einem Einsatz der Materialien als Sekundärbrennstoff die zulässigen Konzentrationen an Schwermetallen sowie Chlor und Sulfat eingehalten werden. Eine stoffliche Verwertung der Kunststoffe ist aufgrund der Verschmutzung erst nach einer aufwändigen Aufbereitung des Stoffstroms möglich, die in der Regel wirtschaftlich nicht vertretbar ist.

Eine weitere Stoffgruppe mit einem erhöhten ökonomischen Wert stellen die Metalle dar. Der Anteil an Fe-Metallen ist mit ca. 2 M.-% bzw. ca. 0,2 M.-% bei NE-Metallen in dieser Zusammenstellung sehr gering. Diese Zahlen liegen unterhalb der Werte, die von Mocker et al. (2009) und Rettenberger (2009) auf der Grundlage von Abfallanalysen aus verschiedenen Zeitperioden und aus Rückbauprojekten zu ca. 3 M.-% für die Fe-Metalle, bzw. zu ca. 0,4 M.-% für NE-Metalle für Deutschland ermittelt wurden. Die Qualität der Metalle ist häufig aufgrund der Verschmutzung, des Kontaktes mit Sickerwasser oder Gasen sowie des Verbundes mit anderen Abfallbestandteilen gering, so dass für das Erzielen einer höheren Vergütung eine weitere Aufbereitung des Fe- und NE-Metallschrottes erforderlich ist.

Ein weiterer Wertstoff, der der Wiederverwertung zugeführt werden kann, ist Glas, dessen Anteil im Abfall zu ca. 1 M.-% ermittelt wurde. Die Kleinteiligkeit und die starke Verschmutzung durch mineralische Feinstmaterialien erschweren eine maschinelle Aufbereitung dieser Fraktion, so dass in der Vergangenheit Glas zusammen mit den mineralischen Komponenten i. d. R. wieder auf Deponien abgelagert wurde. Durch eine weitergehende Aufbereitung kann aber auch hier die Qualität der rückgebauten Glasfraktion erhöht werden. Auch für diesen Aufbereitungsschritt ist in der Regel keine wirtschaftliche Basis vorhanden.

Der Anteil der nativ organischen Fraktion im Deponat hängt neben der ursprünglich in der Deponie eingebauten Masse vor allem auch vom Alter des Deponiekörpers und den Randbedingungen des biologischen Abbaus ab, die innerhalb des Deponiekörpers stark variieren können. Diese Fraktion umfasst auch Papier, Holz, Leder und Textilien, die jedoch häufig aufgrund der Nutzung als heizwertreiche Fraktion getrennt erfasst werden. Die Identifikation von biologisch abbaubaren Substanzen im rückgebauten Material erweist sich häufig als schwierig, da der überwiegende Anteil sich in der Feinfraktion befindet und häufig aufgrund der Größe nicht als Organik erkannt wird. Eine gezielte Abtrennung dieser Fraktion erfolgt daher in der Praxis kaum. Wenn die chemischen Analysen (z. B. Atmungsaktivität, Gasbildungspotenzial) in der Feinfraktion erhöhte biologische Abbauraten ergeben, so kann eine biologische Behandlung erfolgen. Infolge der geringen Stückgröße und des häufig erhöhten Wassergehaltes der Feinfraktion bieten sich eher anaerobe Verfahren mit Biogaserzeugung und Energienutzung an. Im internationalen Bereich wurden bereits gezielt Komposte aus rückgebauten Materialien hergestellt, in Deutschland genügen diese Materialien nicht den Anforderungen an Kompost in Bezug auf die Schadstoffbelastung.

**Tabelle 2-2:** Vergleich der Abfallzusammensetzung auf der Grundlage der Vorabschätzung und der ermittelten Ist-Situation (Angaben in M.-% FS)

Parameter	Vorabschätzung	Ist-Zustand
Wassergehalt	35	30
Anorganik (Mineralik)	70	66
Organik	30	30
Fe- und NE-Metalle	4	3,5
Kunststoffe	11	14
Holz	4	8
Heizwertreiche Fraktion	22	30
Stückgrößenverteilung < 60 mm	60	65

Im Rahmen der Untersuchungen an der Deponie „Pohlsche Heide“ wurde vorab die stoffliche Zusammensetzung auf der Grundlage der örtlichen Situation abgeschätzt (Tabelle 2-2). Zusätzlich ist die tatsächliche Abfallzusammensetzung, die sich auf der Grundlage der Sortieranalysen an den rückgebauten Deponaten ergibt, dargestellt. Bei der Angabe der Anorganik des Deponats ist zu berücksichtigen, dass hier neben Boden und Steinen auch Glas, Sortierreste sowie die nicht sortierbare Fraktion < 20 mm



enthalten ist. Die Fraktion Organik beinhaltet in Bezug auf biologisch abbaubaren Substanzen nur Holz, andere nativ-organische Materialien können i. d. R. bei Sortieranalysen aufgrund des bereits erfolgten Abbaus nicht identifiziert werden bzw. sie sind in der Fraktion < 20 mm enthalten. Der Vergleich zeigt jedoch, dass zwar erwartungsgemäß Differenzen zwischen den erwarteten und den tatsächlichen Wertstoffgehalten bestehen, diese jedoch wie im vorliegenden Fall bei gründlicher Auswertung vorhandener Daten gering gehalten werden können.

### 3. Planung und Umsetzung des Rückbaus

*Kai Münnich, Klaus Fricke*

Das Kapitel 3 beschäftigt sich mit der Planung und Umsetzung des Rückbaus. Die Herangehensweise entspricht dem Stand der Technik (z. B. Rettenberger 1998; DWA 2012) und wird daher hier nur kurz beschrieben.

In beiden Unterkapiteln zeigt sich, dass der Arbeitsschutz während der Rückbaumaßnahme eine entscheidende Größe darstellt, die unmittelbar die Durchführung und die dabei einzusetzenden Technologien beeinflusst. Im Abschnitt 3.1 wird vor allem auf Maßnahmen zur Reduktion von Gasemissionen eingegangen. Der Abschnitt 3.2 beschreibt den eigentlichen Rückbau, die Notwendigkeit und Anlage von Zwischenlagern vor der Vorkonditionierung und den Wiedereinbau von Reststoffen.

Die Umsetzung des Rückbaus ist eng mit der Vorkonditionierung verbunden (Kapitel 4).

#### 3.1. Planung des Rückbaus

Die Durchführung des Rückbaus, d. h. das Aufnehmen der abgelagerten Abfälle aus dem Deponiekörper, ist den standortspezifischen Gegebenheiten anzupassen. Entscheidende Größen hierbei sind u. a. Abfallzusammensetzung und –alter, Deponieform (Deponie oberhalb der natürlichen Geländeoberfläche oder Grube), vorhandene Verkehrswege, Zwischenlagerkapazitäten.

Bereits bei den Voruntersuchungen und der Planung des Rückbaus muss geprüft werden, ob vor dem eigentlichen Rückbau, d. h. dem Abgraben, eine Belüftung der Abfälle erfolgen muss. Dies kann durch eine Auswertung vorhandener Daten zur Quantität und Qualität des Deponiegases sowie deren zeitliche Veränderung, durch Untersuchungen an Probebohrungen und Laborversuche an Deponatproben erfolgen.

Das Belüften bewirkt eine Umstellung der im Deponiekörper üblicherweise vorhandenen anaeroben Verhältnisse, so dass die Emissionen an klimarelevanten Gasen und Gerüchen sowie der Aufwand in Bezug auf die zu treffenden Arbeitsschutzmaßnahmen erheblich reduziert werden. Durch die Aerobisierung erfolgt ebenfalls ein biologischer Abbau organischer Substanzen, wobei dies im Rahmen des Deponierückbaus nicht das primäre Ziel der Belüftung ist.

Die Belüftung des Abfalls kann passiv oder aktiv erfolgen; die Auswahl des geeigneten Verfahrens hängt von den beim Abgraben zu erwartenden Emissionen ab.

Die passive Belüftung erfolgt im oberflächennahen Bereich dadurch, dass als Folge von Luftdruckschwankungen und Windeinfluss Sauerstoff aus der Atmosphäre in den Abfall trotz der geringen Gasemissionen eindringen kann. Die Schichtmächtigkeit, in der dann abgegraben werden kann, hängt vom Gasbildungspotenzial, den Witterungsbedingungen (Lage des Abgrabens zur Hauptwindrichtung), der Ablagerungsdichte der Abfälle sowie dem Wassergehalt ab. In der Regel können bei älteren Abfällen mit einem geringen Gasbildungspotenzial aerobe Schichtstärken von 1 – 2 m innerhalb weniger Tage erzielt werden (DWA 2012). Bei jüngeren Abfällen kann die erforderliche Belüftungsdauer erheblich länger und die erzielbare aerobe Schicht deutlich geringer sein. Beide Größen müssen im Vorfeld am Deponiestandort ermittelt werden.

Bei der aktiven Belüftung wird über Sonden oder Lanzen Luft (eventuell zusätzlich mit Sauerstoff angereichert) in den Deponiekörper gepresst. Gleichzeitig wird ebenfalls über Sonden und Lanzen Luft aus dem Deponiekörper abgesaugt und einer Abluftreinigung zugeführt. Der Einflussbereich der Belüftung um die Injektionssonde herum ist sehr begrenzt. Durch eine rasterförmige Anordnung der Belüftungs- und Absaugsonden (Abstand 5 – 10 m) können gezielte Luftbewegungen in der Deponie erzeugt werden, so dass sich der Einflussbereich entsprechend vergrößert. Die Schichtstärke der aerobisierten Schicht liegt in der Regel bei 2 – 4 m, die Aerobisierung dieser Schicht kann in einem Zeitraum von einem Tag bis maximal 2 Wochen erreicht werden (DWA 2012).

Beim Einsatz einer aktiven Belüftung können zwei unterschiedliche Verfahren zum Einsatz kommen, die sich vor allem in Bezug auf den eingesetzten Druck beim Belüften unterscheiden, während das eingeleitete Luftvolumen bei beiden Verfahren gleich ist:

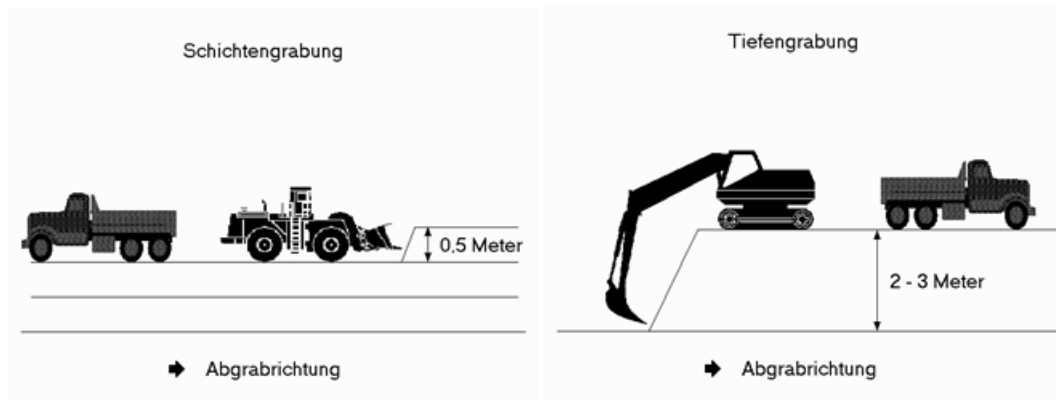
- Hochdruckverfahren (Impulsverfahren),
- Niederdruckverfahren (kontinuierliche Druck-Saugbelüftung).

Beim **Hochdruckverfahren** befindet sich am oberen Ende einer jeden Belüftungslanze ein Druckbehälter (Puster), in dem kontinuierlich ein Luftdruck im Bereich von 2 - 10 bar aufgebaut wird. Die komprimierte Luft wird nach Erreichen des gewählten Druckes schlagartig innerhalb weniger Millisekunden in den Abfall eingeleitet. Der dadurch entstehende Druckstoß sorgt dafür, dass es im Bereich um die Lanzen zu einer Auflockerung des Abfalls kommt, so dass auch Zonen, in denen der Abfall dicht gelagert ist, mit Luft versorgt und damit auch aerobisiert wird. Zur Steigerung des Abbaus der organischen Substanzen kann auch mit Sauerstoff angereicherte Luft eingeblasen werden. Das bei der Belüftung entstehende Gemisch aus Luft und Deponiegas muss mittels geeigneter Filter gereinigt werden. Bei erhöhten Methankonzentrationen (> 10 Vol.-%) in der Abluft werden in seltenen Fällen Hochtemperaturschwachgasfackeln eingesetzt, vornehmlich werden jedoch nichtkatalytische, autotherme Oxidationsverfahren (RTO) bzw. bei sehr geringen Abluftbelastungen Biofilter genutzt.

Beim **Niederdruckverfahren** hingegen wird kontinuierlich Luft mit geringem Druck (je nach Verfahren 0,5 – 1, 5 bar bzw. 0,01 – 0,05 mbar) in den Deponiekörper eingeleitet und gleichzeitig das entstehende Gasmisch über Sauglanzen aus dem Deponiekörper entfernt und gereinigt (s. o.). Infolge des beim Belüften eingesetzten geringeren Druckes kann nicht ausgeschlossen werden, dass stark verdichtete Bereiche nicht aerobisiert werden. Um die Gefahr einer Kanalbildung im Abfall zu reduzieren, sollte die Durchströmungsrichtung im Stundentakt gewechselt werden. Niederdruckverfahren weisen den Vorteil einer besseren Regulierung des Luftstroms in den einzelnen Lanzen auf, und durch die kontinuierliche Be- und Entlüftung kann der Wassergehalt im Abfall reduziert werden, was sich positiv auf die nachfolgenden Behandlungsschritte auswirkt. Durch eine Erwärmung der zuzuführenden Luft kann in Zeiten geringer Außentemperatur die biologische Aktivität im Deponiekörper gesteigert werden.

### 3.2. Umsetzung des Rückbaus

Nach der eventuell erforderlichen Belüftung eines Deponieabschnittes erfolgt das Abgraben des Deponats. Dabei kann zwischen zwei grundsätzlichen Abgrabeverfahren unterschieden werden (Abbildung 3-1), die auch in Kombination eingesetzt werden können.



**Abbildung 3-1:** Formen des Abgrabens des Deponats (Rettenberger 1998)

Bei der Schichtengrabung erfolgt der Abbau flächig von oben nach unten in einer Schichtstärke von ca. 0,5 bis 1 m. Ist im Vorfeld nur eine passive Belüftung erforderlich, so sollte aufgrund der geringeren Schichtstärke der Aerobisierung dieses Verfahren eingesetzt werden. Das Abtragen der Abfälle kann mittels Radlader oder Laderaupe erfolgen, die bei diesem flächenhaften Abtrag eine hohe Leistungsfähigkeit aufweisen. Dieses technisch einfache Verfahren kann sowohl bei Gruben- als auch Haldendeponien eingesetzt werden. Nachteil eines großflächigen Abtrags ist die erhöhte Sickerwasserbildung als Folge von Regenereignissen.

Bei der Tiefgrabung erfolgt der Abtrag stufenweise von oben nach unten vom Rand der Deponie her. Die Abgrabetiefe beträgt hier ca. 2 – 3 m, so dass bei Deponien, die noch relevante Gasemissionen beim Aufgraben aufweisen können, eine vorherige aktive Belüftung erforderlich ist. Auf den beim Abgraben freigelegten Flächen kann dann unmittelbar mit aktiven Belüftungsmaßnahmen begonnen werden. Der bautechnische Aufwand bei diesem Verfahren ist höher, denn die Stufen müssen durch die einzusetzenden Baumaschinen und Transportfahrzeuge sicher befahrbar sein. Die Standsicherheit der Stufe muss auch bei einem Austritt von Sickerwasser an der Grabeböschung sichergestellt sein. Zu Sickerwasseraustritten kann es als Folge von Regenereignissen bzw. von eingestautem Schichtenwasser (im Basisbereich der Deponie) kommen. Das Abgraben der Abfälle erfolgt bei diesem Verfahren i. d. R. mit einem Löffelbagger, wobei bei Vorhandensein von großteiligen Abfällen wie z. B. Kunststofffolien der Einsatz eines Baggers mit Polypgreifer vorteilhaft sein kann. Dieses Abgrabeverfahren kann bei Haldendeponien, aber auch Grubendeponien mit großer Grundfläche erfolgreich eingesetzt werden.

Zum Transport des abgegrabenen Deponats zur weiteren Aufbereitung werden i. d. R. LKW oder Dumper eingesetzt. Es sollte nach Möglichkeit versucht werden, die vorhandenen Deponiestraßen zu nutzen. Je nach örtlicher Situation des Deponierückbaus kann der Transport auch mit Förderbändern vorteilhaft sein, die mittels Radlader beschickt werden.

Alle im Abgrabebereich einzusetzenden Fahrzeuge und Baumaschinen müssen mit Schutzbelüftungsanlagen ausgestattet sein. Zur Minimierung von Staubverwehungen muss eine Befeuchtung im Abgrabebereich und auf den Transportwegen eingeplant werden.

Bei Fahrzeugen und Baumaschinen, die den Abgrabebereich verlassen, muss sichergestellt werden, dass ein Verschleppen von Kontaminationen über die Reifen/Ketten

nicht erfolgt. Dies kann durch eine ausreichend lange Abrollstrecke innerhalb des Betriebsgeländes und/oder durch eine Reifenwaschanlage erfolgen. Weitere Arbeitsgeräte wie z. B. Ladeschaufeln oder Greifer müssen z. B. mittels Hochdruckreiniger gesäubert werden. Die Waschwässer müssen gefasst und gereinigt werden. Bei der Abrollstrecke muss die Staubbildung durch regelmäßiges Reinigen und Befeuchten minimiert werden.

Beim Abgraben können Störstoffe angetroffen werden, die zum einen auf Grund ihrer Abmessungen und stofflichen Zusammensetzung (z. B. Eisenträger, Betonbauteile, Autoreifen) und zum anderen auf Grund des enthaltenen Schadstoffpotenzials (z. B. Bigbags mit Asbestabfällen, geschlossene Gebinde mit unbekanntem Inhalt) nicht einer weiteren mechanischen Konditionierung zugeführt werden dürfen. Diese Materialien müssen unmittelbar an der Stelle der Abgrabung abgetrennt und gesondert gelagert werden. Beim Antreffen von Sonderabfällen sollten diese in verschließbaren Containern bis zur weiteren Entsorgung zwischengelagert werden.

Die Notwendigkeit für Zwischenlagerflächen kann sich auch für das beim Abgraben gewonnene Material ergeben. Bei einer Vorkonditionierung des Deponats off-site kann eine Zwischenlagerung vor dem Weitertransport notwendig sein. Erfolgt die Vorkonditionierung auf dem Deponiebetriebsgelände, so sind i. d. R. Zwischenlagerflächen erforderlich, um einen kontinuierlichen Betriebsablauf der Aufbereitung zu gewährleisten. Folgende Bereiche können zur Zwischenlagerung genutzt werden (DWA 2012):

- Der zurückzubauende Deponiekörper selbst,
- basisabgedichtete Deponieabschnitte,
- Lagerflächen außerhalb des Deponiekörpers auf dem Gelände des Entsorgungsstandortes oder der Altdeponie,
- Lagerflächen außerhalb des Deponiekörpers an externen Standorten.

Bei der Anlage von Zwischenlagern müssen u. a. folgende Punkte beachtet werden (DWA, 2012):

- Zugänglichkeit und Arbeitsbereiche für Transport- und Ladefahrzeuge,
- abgedichtete Fläche mit Fassung und Ableitung entstehender Sickerwässer,
- Beurteilung der Emissionssituation (Staub, Geruch, Lärm),
- Brandschutz.

Wird ein Zwischenlager eingerichtet bzw. erfolgt nach der Behandlung der Abfälle am gleichen Standort eine Wiederablagerung der Reststoffe, die nicht einer Verwertung zugeführt werden können, so ist das hierfür vorzuhaltende Volumen deutlich geringer als vor dem Rückbau. Die Volumeneinsparung gegenüber dem ursprünglichen Einbau ist u. a. abhängig von der Abfallbehandlungstiefe beim ELFM, der Abfallzusammensetzung und der ursprünglichen Einbaudichte. Weist der abzubauende Deponiekörper bereits eine hohe Einbaudichte auf (Einbau mit Kompaktor und/oder hoher Anteil an Mineralik), so ist die zu erwartende Volumenreduktion gering. Erfolgt nur eine Umlagerung des Abfalls, d. h. es erfolgt keine weitere Behandlung der Abfälle vor der Wiederablagerung, so kann häufig eine Volumenreduktion von ca. 15 – 30 % beobachtet werden. Erfolgt eine Abtrennung der Grobfraction, so wird Masse entfernt und die Materialdichte des wieder abzulagernden Abfalls erhöht sich. Die Verdichtungsfähigkeit des Materials nimmt ebenfalls zu, da große Abfallbestandteile, die teilweise kaum verdichtbar sind, entfernt wurden. Volumenreduktionen im Bereich von 40 - 60 % können je

nach Stückgrößenverteilung des Deponats und des gewählten Siebschnittes erzielt werden. Erfolgt eine aufwändigere Behandlung der Feinfraktion, so kann ein großer Anteil der Abfallmasse einer Verwertung zugeführt werden und die Materialdichte nimmt weiter zu. Wird z. B. nur noch Material < 10 mm abgelagert, so sind Volumenreduktionen von 70 – 80 % möglich. Für die Abschätzung der Volumenreduktion ist die Kenntnis der vorhandenen Einbaudichte vor und die erzielbare Einbaudichte nach der ELFM-Maßnahme erforderlich. Die Einbaudichte vor dem Rückbau kann im Rahmen der Historischen Erkundung bzw. anhand der Voruntersuchungen am Deponiekörper abgeschätzt werden. Der Wertebereich der Einbaudichten nach der Aufbereitung der Abfälle kann mit Hilfe von Proctorversuchen im Labormaßstab ermittelt werden. Für die Wiederablagerung der Abfälle ist kein Kompaktor erforderlich, das Material weist je nach gewähltem Siebschnitt Eigenschaften von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen bzw. von Erdmassen auf. Der Einbau kann mit Raupen erfolgen, die Verdichtung mit Schafffußwalzen bzw. Glattmantelwalzen.

Ein wesentlicher Aspekt beim Rückbau des Deponiekörpers ist der Arbeitsschutz des eingesetzten Personals. Auch wenn die intensive Phase der Vorerkundung des rückzubauenden Deponiekörpers keine konkreten Hinweise auf kontaminierte Bereiche ergeben hat, kann beim Rückbau nicht ausgeschlossen werden, dass

- trotz vorhergehender Belüftung toxische und/oder explosive Stoffe freigesetzt werden,
- gesundheitsgefährdende Fasern (Asbest), Flüssigkeiten, Stäube angetroffen werden,
- aufgrund der biologischen Umsetzungsprozesse Sporen, Keime oder Pilze freigesetzt werden.

Auch bei Deponien mit Rückständen aus Müllverbrennungsanlagen können einige dieser Stoffe angetroffen werden. Die entsprechenden Gesetze, Verordnungen sowie Technische Regeln, die den Arbeitsschutz auf Deponien sowie das Arbeiten in kontaminierten Bereichen regeln, müssen daher beachtet werden.

Für den Rückbau bedeutet dies u. a., dass z. B. eine Fläche zur Einrichtung eines Schwarz-Weiß-Bereiches außerhalb der Abgrabungsfläche zur Verfügung stehen muss. Des Weiteren müssen auch während des Abgrabens in Abhängigkeit vom Gefährdungspotenzial stichprobenweise, regelmäßig oder kontinuierlich Emissionsmessungen durchgeführt werden.

## 4. Vorkonditionierung und Stoffstromtrennung

*Anja Maul, Thomas Pretz*

Aus dem Rückbau stämmiges Deponat enthält werthaltige Stoffgruppen wie Metalle und heizwertreiche Abfallbestandteile, die für eine Verwertung erschlossen werden können. Die dafür erforderliche Aufbereitungstechnologie lässt sich in die Verfahrensstufen Vorkonditionierung, erste Voranreicherung und produktorientierte Stoffstromtrennung einteilen, die in Kapitel 4 beschrieben wird.

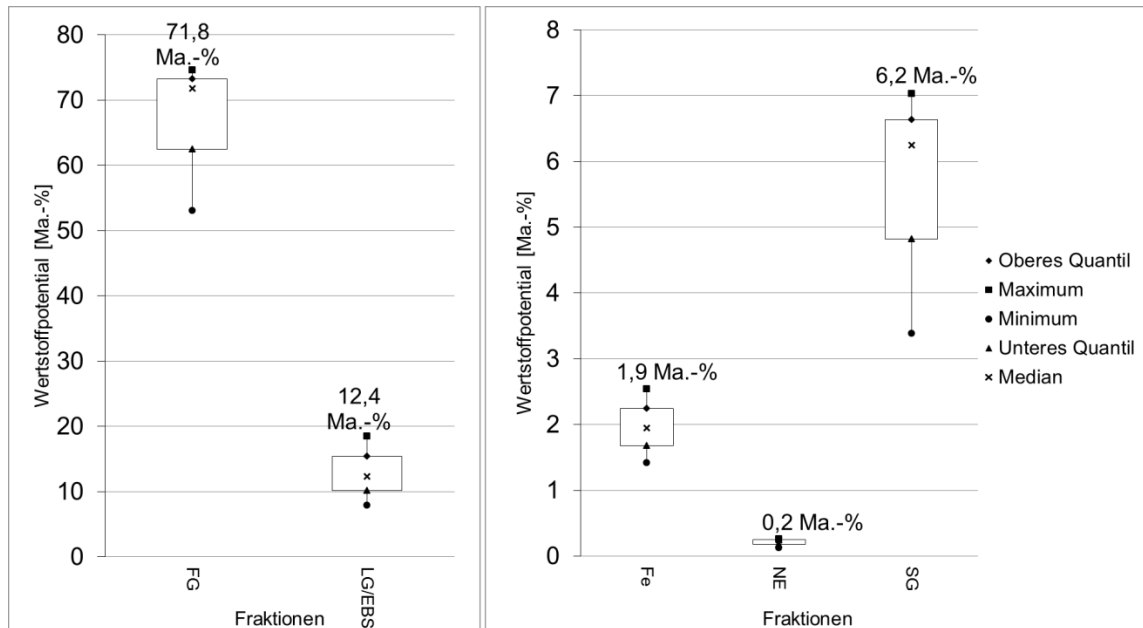
Der Abschnitt 4.1 leitet zunächst in die zum Stand der Technik gehörenden technischen Lösungen ein und befasst sich dann mit einer allgemeingültigen Vorgehensweise der Vorkonditionierung. In Abschnitt 4.2 werden die aus der Stoffstromtrennung erhaltenen Produkte dargestellt.

Die erzielbaren Stoffströme und das Verhältnis der Massenströme zueinander werden entscheidend durch die eingesetzte Technik beeinflusst, so dass je nach Aufbereitungsziel (z. B. Kunststoffabtrennung zur Verwertung (Kapitel 5) oder Abtrennung von Feinmaterial (Kapitel 6) eine Optimierung der Anlage erforderlich ist.

### 4.1. Allgemeine Vorgehensweise zur Vorkonditionierung

Technische Lösungen werden auf der Basis des Standes der Technik beschrieben soweit es sich um standardisierte Aufbereitungstechnik handelt. Als standardisierte Aufbereitungstechnik werden Lösungen charakterisiert, die mit entsprechenden betrieblichen Referenzen ihre Eignung bewiesen haben. Da Verfahrensentwicklungen dem Bereich Forschung und Entwicklung zuzuordnen sind, sind sie kein Gegenstand dieses Leitfadens.

Die Abfallzusammensetzung wird hier zusammenfassend unter Berücksichtigung technischer Separationsprozesse dargestellt. Da es sich bei Deponaten um heterogene Abfallgemische handelt, ist die Angabe von Zusammensetzungen als Durchschnittswert fehlerbehaftet. Beruhen die Erkenntnisse auf einer manuellen Sortierung von Proben, wird zwar ein hinsichtlich der stofflichen Komposition detailliertes Ergebnis ausgewiesen, dieses berücksichtigt jedoch nicht das Verhalten in technischen Trennprozessen. Vor diesem Hintergrund ist hier beispielhaft die stoffliche Zusammensetzung des aus der Deponie „Pohlsche Heide“ aufgenommenen Deponats in Form technisch erzeugbarer Stoffgruppen dargestellt. Auch hier streuen die Ergebnisse aus Einzelanalysen erheblich, was mit der Darstellung in Abbildung 4-1 als Box-Whisker-Diagramm zum Ausdruck gebracht wird. Um den unterschiedlichen Größenordnungen der Stoffströme Rechnung zu tragen, werden zwei Maßstäbe für das Massenausbringen, hier als „Wertstoffpotenzial“ gekennzeichnet, verwendet.

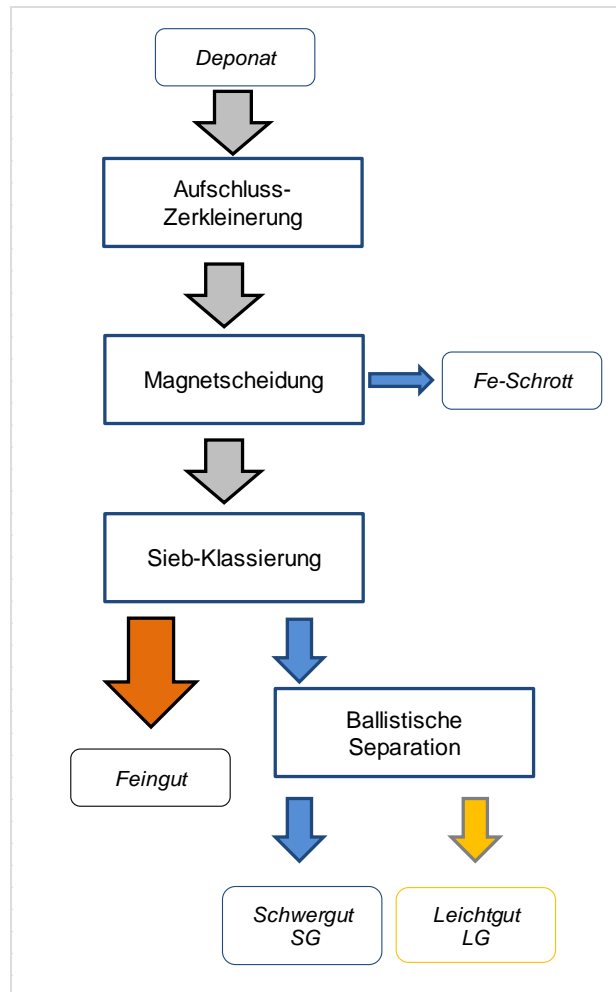


**Abbildung 4-1:** Zusammensetzung von Deponat der Deponie „Pohlsche Heide“

Der größte Massenanteil ist in der Regel ein Feingut < 60 mm (FG) mit überwiegend mineralischen Eigenschaften. Es bindet zudem den wesentlichen Anteil an Feuchte. In dem diesem Leitfaden zugrundeliegenden Projekt „TönsLM“ lag dieser Massenanteil bei durchschnittlich > 70 %. Daneben findet sich eine heizwertreiche Fraktion (hier als Leichtgut LG bzw. Ersatzbrennstoff EBS bezeichnet) aus Kunststoffen, Textilien, Holz u. a. sowie Fe- und NE-Metallen > 60 mm. Abtrennbare Mineralanteile > 60 mm und andere ballistisch abtrennbare Materialien, hier als Schwergut (SG) ausgewiesen, fanden sich mit einem Anteil von durchschnittlich 6,2 %. Bei Siedlungsabfalldeponien mit hohem Bauschuttanteil dürften sich die Verhältnisse der abtrennbaren „Stoffgruppen“ verschieben. Außerdem gilt es zu berücksichtigen, dass eine maschinelle Gewinnung von Deponat bei Rückbaumaßnahmen im lagenweisen Abtrag erfolgt, so dass nur in einzelnen Lagen oder Deponiehorizonten auftretende Besonderheiten der Abfallsammensetzung wie etwa Abdeckschichten mit hohem mineralischen Anteil erwartet werden müssen. Im mit dem Rückbau zeitlich eng verknüpften Aufbereitungsbetrieb kann es daher temporär zu deutlich größerer Streuung der Zusammensetzung kommen als in Abbildung 4-1 ausgewiesen.

Die Aufgabenstellung von Vorkonditionierung und Voranreicherung als erste Stufe einer Stofftrennung geht aus der Abbildung 4-2 hervor. Da Siedlungsabfälle mit Einsatz von Kompaktoren auf Deponien eingebaut wurden, liegen sie dort mit einer Schüttdichte von über 1 t/m<sup>3</sup> vor. Der Ausbau mit Baggern führt zwar zu einer Auflockerung, diese genügt jedoch noch nicht den Anforderungen einer mechanischen Behandlung mit dem Ziel einer stofflichen Separation.





**Abbildung 4-2:** Schema der mechanischen Konditionierung

- Als erste Prozessstufe ist eine Aufschlusszerkleinerung erforderlich. Hauptaugenmerk liegt hier auf dem Aufschluss von Konglomeraten, die Zerkleinerung von Abfallpartikeln sollte nur große Einzelteile mit Kantenlängen > 500 mm betreffen.
- Zum Schutz von Aggregaten sollten schwere Einzelteile wie z. B. Eisenteile vor einer weiteren Behandlung entnommen werden. Diese Prozessstufe erfüllt damit allerdings noch nicht das Ziel des maximalen Ausbringens an Fe-Schrotten.
- Die Siebklassierung erfüllt die anspruchsvolle Aufgabe, feuchtes Feingut mit einer mittleren Korngröße  $d_{50}^2 < 10$  mm aus dem Gemisch zu trennen und den Massenstrom für eine Voranreicherung bzw. nachfolgende produktorientierte Stoffstromtrennung deutlich zu verringern (vgl. Abbildung 4-1). Die Feingutabtrennung dient weiterhin der Vorkonditionierung von Stoffströmen, die in Folgeprozessen produktorientiert sortiert werden sollen. Diese Prozesse profitieren von einer intensiven oberflächigen Reinigung des Materialgemischs von anhaftenden organischen und mineralischen Verschmutzungen. Daraus erklärt sich für den Prozess der Siebklassierung die Forderung sehr hoher Siebwirkungsgrade bzw. maximierter Prozesseffizienz.
- Die ballistische Separation dient der Aufteilung des bereits auf Schüttdichten von ca. 200 kg/m<sup>3</sup> aufgelockerten Siebüberlaufs in ein Schwergut aus vorwiegend drei-

<sup>2</sup>  $d_{50} = 10$  mm bezieht sich auf die mittlere Korngröße eines Materials, d. h. 50 M.-% sind kleiner bzw. größer als 10 mm

dimensionalen Partikeln und ein Leichtgut, in dem zweidimensionale Abfallbestandteile angereichert werden. Der Prozessschritt kann mit einer Siebklassierung kombiniert werden, um so den Wirkungsgrad der Klassierung insgesamt zu erhöhen.

Die zu erwartenden Trenngrade in der Verfahrenskette der Vorkonditionierung liegen unter Berücksichtigung der komplexen Abfalleigenschaften von Deponat und der hohen Feuchte unterhalb üblicher Erwartungswerte, wie sie von Maschinenherstellern angeboten werden. Fehlausträge von Zielprodukten sind ebenso unvermeidlich wie eine Kontamination der Vorkonzentrate mit nicht abgetrenntem, feuchtem Feingut.

Im Leichtgut eines ballistischen Separators werden insbesondere die heizwertreichen Stoffgruppen Kunststoffe, Textilien und Holz mit einer Konzentration von mehr als 50 % angereichert. Damit ist dieses Vorkonzentrat grundsätzlich für eine weitere produktorientierte Stoffstromtrennung geeignet. Zielprodukte können sowohl Kunststoffe für eine werkstoffliche Verwertung als auch ein Ersatzbrennstoff mit definierten Eigenschaften sein.

Im Schwergut findet eine Anreicherung von Mineralik und Metallen statt, allerdings werden auch nasse Hölzer und dreidimensionale, schwere Kunststoffteile in nennenswertem Umfang in diesem Stoffstrom ausgebracht. Ein direkter Einsatz derartiger Gemische ist weder als Brennstoff (zu hoher Aschegehalt) noch zu Ablagerungszwecken (zu hoher Glühverlust) möglich.

#### 4.1.1. Technische Lösungen zur Vorkonditionierung

Die hier skizzierte Vorkonditionierung kann sowohl mit mobiler Aufbereitungstechnik direkt am Ort des Rückbaus erfolgen als auch in vorhandenen mechanischen Restabfall-Behandlungsanlagen wie MBA, die über die notwendigen Basisprozesse verfügen.

Die Wahl der technischen Lösung richtet sich nach immissionsrechtlichen, ökonomischen und Verfügbarkeitskriterien. Hier muss standortspezifisch eine Abstimmung von Rückbaukapazität und Vorkonditionierungskapazität erfolgen, um die Frage des Einsatzes von mobiler, semimobiler oder stationärer Behandlungstechnik beantworten zu können. In allen Fällen kommt standardisierte Aufbereitungstechnik zum Einsatz.

Im Vergleich zu stationären Lösungen in bestehenden Abfallbehandlungsanlagen hat die mobile in-situ Aufbereitung insbesondere unter dem Gesichtspunkt Optimierung von Transportwegen Vorteile. Weiterhin eröffnen in-situ Lösungen die Möglichkeit, die Aufbereitungskapazität an die Gewinnungskapazität anzupassen. Dagegen sind bei der Mitnutzung vorhandener Anlagen Einschränkungen hinsichtlich freier Kapazitäten zu erwarten. Nachteilig können sich bei in-situ Lösungen mit Einsatz mobiler Technik allerdings Witterungseinflüsse und u. U. immissionsrechtliche Genehmigungsaufgaben auswirken.

Bei beiden Lösungen ergeben sich ähnliche technische Grenzen der Dimensionierung für die Kernprozesse.

- Für die Aufschlusszerkleinerung eignen sich die meisten handelsüblichen, langsam laufenden Kammwalzenzerkleinerer, die auf ein Kornspektrum von etwa  $d_{95}^3 < 300$  mm zerkleinern. Da im Deponat sowohl zähelastische als auch nicht zer-

---

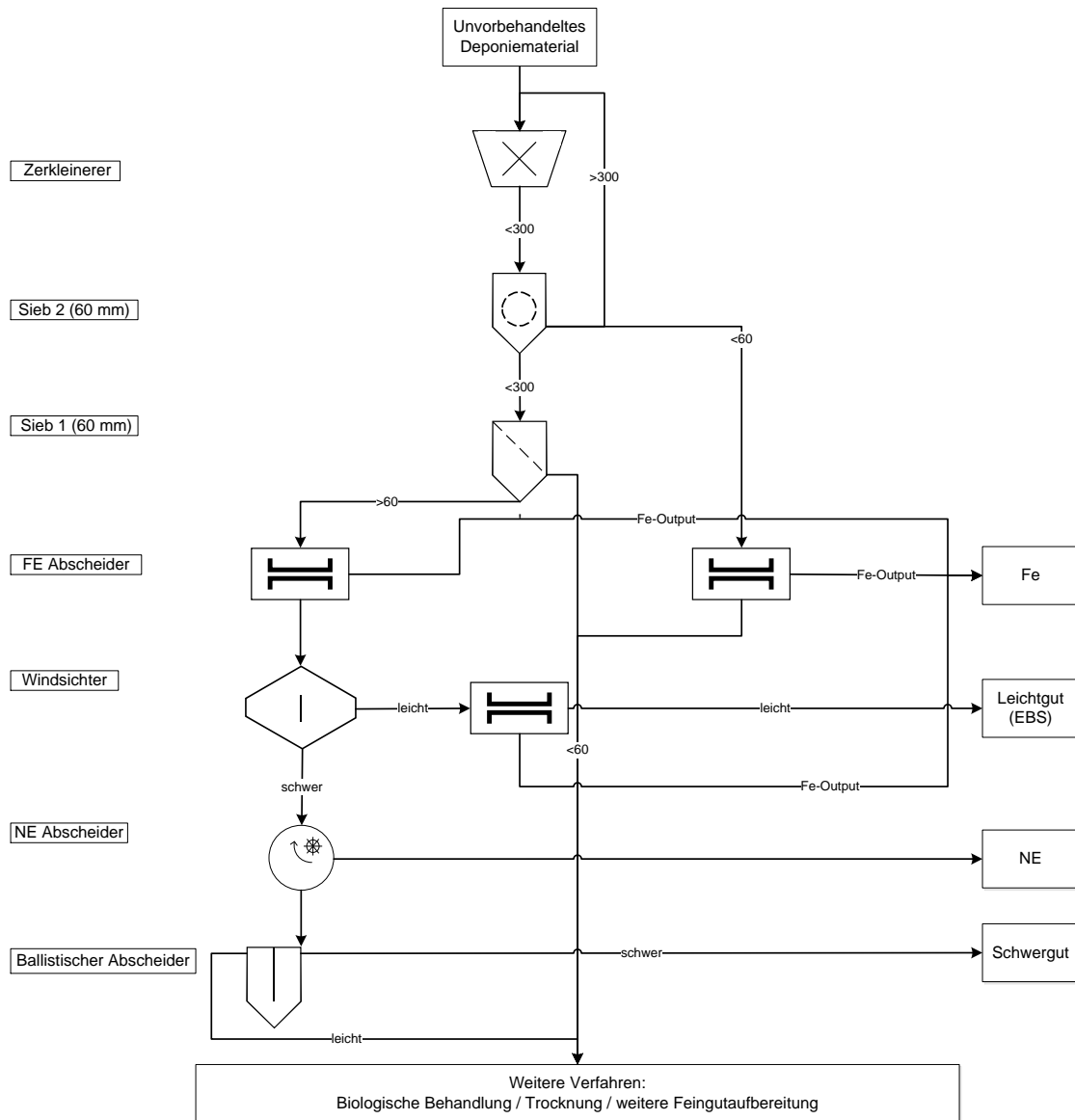
<sup>3</sup>  $d_{95} = 300$  mm bedeutet, dass 95 M.-% eines Materials kleiner als 300 mm sind

kleinerungsfähige Einzelteile erwartet werden müssen, sollte eine Auslegung in der Größenordnung von nicht mehr als 30 t/h erfolgen. Wird eine höhere Aufbereitungskapazität benötigt, kann auf eine Prozessgestaltung über mehrere Aufbereitungslinien zurückgegriffen werden.

- Die Siebklassierung kann sowohl mit stationären „Müllsieben“ als auch mit stationären bzw. mobilen Trommelsieben durchgeführt werden. Der hohe Feingutanteil von ca. 70 % verlangt ausreichende Verweilzeiten im Trennraum. Insbesondere mobile Siebmaschinen gelangen hier aufgrund limitierter Trommeldurchmesser bei ca. 30 t/h bzw. ca. 100 m<sup>3</sup>/h Aufgabevolumen an ihre Grenzen, wenn sehr gute Siebwirkungsgrade (> 95 %) realisiert werden müssen.
- Da im Siebüberlauf, der je nach Siebwirkungsgrad ca. 35-40 M.-% betragen kann, eine signifikante Auflockerung auf Schüttdichten von ca. 100 kg/m<sup>3</sup> erfolgt, errechnet sich ein Aufgabevolumen von bis zu 120 m<sup>3</sup>/h. Damit werden an ballistische Separatoren hohe Anforderungen hinsichtlich der Volumenkapazität gestellt.

#### 4.1.2. Erkenntnisse zur Vorkonditionierung

Eine mechanische Vorbehandlung von Deponat ist nach dem Stand der Technik der Hausmüllaufbereitung, wie sie in MBA vorgenommen wird, möglich. Der Wassergehalt von Deponat ist partiell höher als der von Hausmüll (30-45 %), so dass insbesondere an die Siebklassierung hohe technische Anforderungen gestellt werden müssen. Hier wird aufgrund der Arbeitsergebnisse eine zweistufige Siebklassierung mit größtmöglichen Verweilzeiten empfohlen. Insbesondere bei Einsatz mobiler Aufbereitungstechnik begrenzt dieses Ziel den Massendurchsatz auf etwa 30 t/h. Ein mögliches Fließbild einer MBA, die auch zur Aufbereitung von rückgebautem Deponiematerial eingesetzt werden kann, ist in Abbildung 4-3 dargestellt. Dieses Fließbild sieht eine zweifache Siebklassierung bei jeweils 60 mm vor. In der MBA-Praxis sind zahlreiche hiervon abweichende Lösungen mit hoher Variation von Siebschnitten anzutreffen. Insbesondere bei Einsatz mobiler Aufbereitungstechnik lassen sich mit Trommelsieben bauartbedingt Siebschnitte von > 100 mm nicht verwirklichen. In diesen Fällen ergeben sich gegenüber Abbildung 4-3 abweichende Siebschnitte, das Prinzip einer zweistufigen Siebklassierung ist jedoch mit Blick auf die notwendige Siebgüte unbedingt umzusetzen.



**Abbildung 4-3:** Schema einer MBA

Erfolgt eine Voranreicherung von „leichten“ Abfallbestandteilen in direkter Kombination mit der Vorkonditionierung, empfiehlt sich die Wahl von ballistischen Separatoren als Dreigut-Trenner, d. h. die Aggregate übernehmen eine weitere Klassierfunktion.

Eine ballistische Separation des Siebüberlaufs  $> 60\text{ mm}$  in ein Leicht- und ein Schwergut ist für den Fall angezeigt, in dem Ansprüche der folgenden Verwertungswege durch weitergehende Vorbehandlung erfüllt werden müssen. Details zu den zu erwartenden Massenströmen zur Bilanzierung des Gesamtprozesses „Vorkonditionierung“ können aus Kapitel 6 entnommen werden.

Wird eine thermische Verwertung auf dem Niveau einer MVA mit Rostfeuerung angestrebt, könnte nur dann auf die ballistische Separation verzichtet werden, wenn lediglich vernachlässigbare Mengenanteile an mineralischem Schwergut zu erwarten sind. Wie die Abbildung 4-1 ausweist, kann die Anwesenheit mineralischer Bestandteile im Deponat allerdings nicht sicher ausgeschlossen werden, als Minimalwert aller Analysen wurde ein Massenanteil von ca. 3 M.-% ermittelt. Insofern übernimmt die Trennstufe „Ballistische Separation“ eine wichtige Schutzfunktion, da hier Störstoffe für eine

Rostfeuerung, wie z. B. schwere dreidimensionale Bestandteile mit hoher Zuverlässigkeit separiert werden können.

Zur Vorkonditionierung und ersten Voranreicherung stehen mehrere Verfahrenskombinationen zur Verfügung, die in Anlehnung an Abbildung 4-3 gestaltet werden können. Eine Übersicht der grundlegenden Verfahrensschritte ist in Tabelle 4-1 zusammengefasst.

**Tabelle 4-1:** Mögliche Varianten der Vorkonditionierung und Voranreicherung

Nr.	Verfahrensschritte	Erzielte Stoffströme
<b>Variante A</b>	Zerkleinerung Siebung (mehrstufig) Magnetscheidung	Heizwertreiche Fraktion (Überkorn > 100 mm) Reste (60-100 mm) Feingut (< 60 mm) Fe-Schrott
<b>Variante B</b>	Zerkleinerung Siebung (mehrstufig) Magnetscheidung Ballistische Separation	Heizwertreiche Fraktion (Überkorn > 100 mm) Feingut (< 60 mm) Fe-Schrott Schwer- und Leichtgut
<b>Variante C</b>	Zerkleinerung Siebung (mehrstufig) Magnetscheidung Ballistische Separation Windsichtung Wirbelstromscheidung Sensorgestützte Sortierung (NIR)	Heizwertreiche Fraktion (Überkorn > 100 mm) Feingut (< 60 mm) Fe-Schrott Schwergut Folien (LG aus Windsichtung) NE-Schrott Kunststoffkörper Reste (60-100 mm)
<b>Variante D</b>	Zerkleinerung Siebung (mehrstufig) Magnetscheidung Allmetallscheidung	Heizwertreiche Fraktion (Überkorn > 100 mm) Feingut (< 60 mm) Fe-Schrott Metallschrott (gemischt) Reste (60-100 mm)

Die einzelnen Varianten können je nach Aufbereitungsziel bzw. der erzeugten Stoffströme unterschieden werden. Variante A umfasst ein technisches Minimalkonzept, das auf das bestmögliche Abreichern des Feingutanteiles ausgelegt ist. Variante B ist um eine ballistische Separation erweitert, um eine erste Voranreicherung für eine nachgeschaltete Wertstoffabtrennung in z. B. LVP-Aufbereitungsanlagen zu ermöglichen. Variante C ist erweitert um eine zusätzliche Verfahrenslinie mit dem Ziel der Kunststoffartentrennung. Die letzte Verfahrenskombination, Variante D, verfolgt das Ziel des maximalen Ausbringens der im Deponat enthaltenen Metalle. Es ist im Einzelfall zu prüfen, welche Variante eingesetzt werden kann anhand der verfügbaren Maschinen und Anlagen sowie anhand der Zusammensetzung des rückgebauten Depo-nats.

Nähere Erläuterungen zu den einzelnen ökologischen und ökonomischen Auswirkungen der einzelnen Varianten sind den Kapiteln 8 bis 9 zu entnehmen.

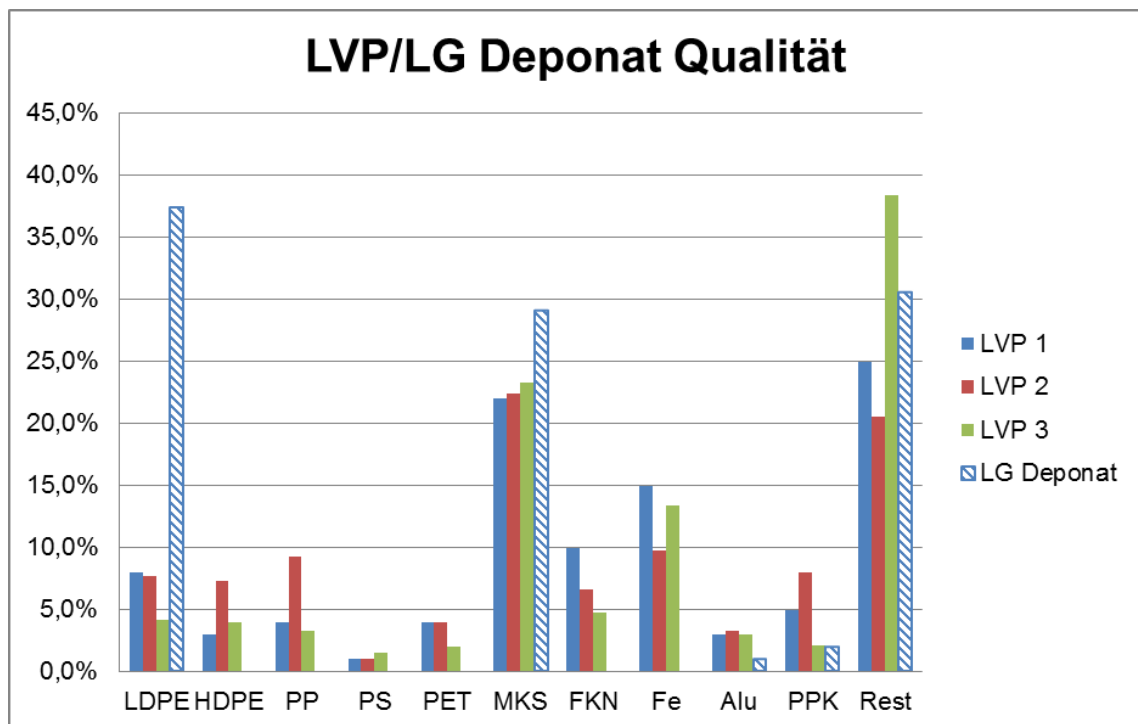
## 4.2. Stoffstromtrennung

Eine produktorientierte Stoffstromtrennung ist dann erforderlich, wenn Teilmengen des Deponats in Verwertungswege geführt werden sollen, die qualitative Anforderungen an den jeweiligen Input-Stoffstrom stellen. Dies gilt sowohl für Ersatzbrennstoff-Kraftwerke und Zementwerke als auch für Aufbereitungswege zur Erzeugung werkstofflich verwertbarer Fraktionen wie etwa Kunststoffe.

Für eine weitergehende Stoffstromtrennung kommen sowohl Leicht- als auch Schwer- gut aus einer mechanischen Voranreicherung in Betracht.

### 4.2.1. Erkenntnisse zur Kunststoffabtrennung

Leichtgut aus der Vorkonditionierung durch einen ballistischen Separator hat eine Zusammensetzung, die der von Gemischen aus der getrennten Erfassung von Verpackungen (LVP) oder mechanisch angereicherten Stoffströmen aus der Restabfall-Aufbereitung in MBA ähnlich ist. Die Zusammensetzung des aus Deponat angereicherten Leichtgutes ist gekennzeichnet durch einen Kunststoffgehalt von bis zu 50 M.-%.



**Abbildung 4-4:** Vergleich Zusammensetzung LVP und LG aus Deponat

In Abbildung 4-4 sind verschiedene Inputqualitäten aus LVP-Analysen dem LG aus Deponat gegenüber gestellt. Die Analyse des Leichtgutes ist ohne differenzierte Polymerbestimmung durchgeführt worden. Alle Folien sind hier als Kunststoffart LDPE ausgewiesen.

Spezialisierte Anlagen zur Aufbereitung derartiger kunststoffreicher Mischabfälle wie etwa LVP-Sortieranlagen können dieses Leichtgut so aufbereiten, dass Kunststoffprodukte erzeugt werden, die den qualitativen Mindestanforderungen der Kunststoffver-

werner genügen. In den für die Kunststoffverwertung angewendeten Normen der DKR<sup>4</sup> sind die wichtigsten physikalischen Eigenschaften festgelegt. Sie beziehen sich auf Kunststoffabfälle, die aus getrennter Sammlung stammen und nur in geringem Maße durch organische Begleitstoffe verunreinigt worden sind.

Im Fall von Deponierückbaumaterial liegt allerdings ein vieljähriger Aufenthalt in einem anaeroben Milieu zugrunde, bei dem insbesondere Geruchsstoffe in Kunststoffe migrieren. Auch die werkstofflichen Eigenschaften von Kunststoffen sind nach dem mehrjährigen Aufenthalt in einer Deponie abweichend zu „jungen“ Kunststoffabfällen. Auffällig ist ein spürbarer Elastizitätsverlust. Weiterhin sind die Oberflächen stark mit anhaftenden und trockenmechanisch nicht trennbaren organischen und mineralischen Feinpartikeln verunreinigt. Der oberflächige Schmutzanteil von Kunststoffen aus Deponat wurde mit ca. 7,5 % (3-D-Kunststoffe) bzw. bis zu 25 % bei Folienkunststoffen bestimmt. Insbesondere der hohe Verschmutzungsgrad führt im standardisierten LVP-Sortierprozess mit qualitätsoptimierter Parametrierung der NIR-Sortiergeräte zu sehr schlechten Trenngraden und damit einem wirtschaftlich nicht vertretbaren, geringen Wertstoffausbringen in die Polymerfraktionen. Stattdessen wird der größte Anteil enthaltener Kunststoffe in eine minderwertige Mischqualität oder den heizwertreichen Reststoff sortiert. Letzterer eignet sich als Eingangsstoff für EBS-Kraftwerke.

Anders als für Leichtgut nach ballistischer Separation stehen für Schwergut aus diesem Prozess keine standardisierten Verfahren zur Verfügung. Die Aufbereitung von Mineral – Holz – Hartkunststoff – Gemischen müsste in spezieller Technologie erfolgen. Die bisher vorliegenden Erfahrungen mit Schwergut aus entsprechenden Trennaggregaten in MBA haben gezeigt, dass keine Produkte erzeugt werden können, die die Ablagerungskriterien der Deponieverordnung erfüllen (vgl. Abschnitt 4.2.3). Es gelingt allenfalls, den heizwertreichen Anteil aus diesen Gemischen mit befriedigenden Trenngraden zu gewinnen.

#### **4.2.2. Erkenntnisse zum Produkt „Ersatzbrennstoff“**

Ersatzbrennstoffe werden für verschiedene thermische Prozesse mit sehr unterschiedlichen Prozessanforderungen produziert. Die Prozesse werden hier nach Aufwand bezüglich einer Stoffstromvorbereitung gegliedert.

Auf der ersten Ebene finden sich Rostfeuerungsanlagen mit robuster Fördertechnik, die nur geringe Anforderungen an die physikalischen Eigenschaften wie die maximale Stückgröße oder das maximale Partikelgewicht stellen. Für diese Anlagen ist – bei Einsatz in entsprechend hoher Verdünnung mit normalem Siedlungsabfall – bereits das vorkonditionierte Deponat ohne Voranreicherung geeignet.

Wird eine Verbrennungstechnik mit erhöhten Anforderungen an die Förderfähigkeit des Ersatzbrennstoffs verwendet, müssen insbesondere Langteile, wickelfähige Folien oder andere Bestandteile, die die Transportfähigkeit im Beschickungssystem einer Verbrennungsanlage beeinträchtigen, in einer Voranreicherungsstufe entfernt werden. Die vorne vorgestellte Voranreicherung mittels ballistischem Separator nach vorheriger Vorkonditionierung ist in der Regel ausreichend, um Schwergut auszuschleusen und den Feinanteil im Abfallgemisch zu begrenzen. Die Vermeidung von Langteilen muss durch geeignete Konfiguration der Aufschlusszerkleinerung sichergestellt werden. Ggf. ist für

---

<sup>4</sup> Deutsche Gesellschaft für Kreislaufwirtschaft und Rohstoffe mbH

das Leichtgut des ballistischen Separators eine weitere Siebklassierung notwendig, um zulässige obere Partikelgrößen einhalten zu können.

Sollen thermische Verfahren mit weitergehenden Brennstoffanforderungen wie z. B. Wirbelschichtanlagen beliefert werden, ist diese Schutzsiebung auf die jeweiligen Anwenderbedingungen abzustimmen. Je kleiner die zulässige maximale Partikelgröße im Ersatzbrennstoff ist, umso größer wird der Massenverlust in dem Siebüberlauf. Höhere Brennstoffausbeuten lassen sich dann nur mittels Nachzerkleinerung erzielen. Da für diesen Prozessschritt schneidende Zerkleinerer zum Einsatz kommen, ergeben sich Anforderungen zum Maschinenschutz, die u. U. zusätzliche Reinigungsmaßnahmen wie eine weitere Schwergutabscheidung erforderlich machen.

Die höchsten Ansprüche stellt der Einsatz von Ersatzbrennstoffen im Zementwerk. Hier muss bei Bedienung der Primärfeuerung eine Partikelgröße von  $< 25$  mm mittels schneidender Zerkleinerung erreicht werden. Da außerdem Heizwerte in der Größenordnung von bis zu  $> 20$  MJ/kg verlangt werden, muss das im ballistischen Separator der Voranreicherungsstufe erzeugte Vorprodukt nicht nur von schweren Bestandteilen, sondern auch von Inhaltsstoffen gereinigt werden, die nicht in der begrenzten Verweilzeit im Brennraum verbrennen können. Übliche qualitative Anforderungen (vgl. Abschnitt 5.1 ff) sind durch Windsichtung zu erfüllen, wobei nur die dünnwandigen Bestandteile in das Ersatzbrennstoff-Produkt sortiert werden, die bei geringen Trenngeschwindigkeiten als Leichtgut ausgetragen werden können.

Der Einsatz im Zementwerk ist weiterhin mit Mindestanforderungen hinsichtlich der chemischen Parameter verbunden. Hier hat sich gezeigt, dass insbesondere der Chlorwert in einem Ersatzbrennstoff auf Deponatbasis grenzwertig ausfällt. Eine produktorientierte Stoffstromtrennung sollte daher nur unter Verwendung einer Sortierstufe für die Abtrennung PVC haltiger Materialströme implementiert werden.

Geringere Qualitätsanforderungen mit größerer Korngröße und niedrigerem Heizwert sind bei der Verbrennung im Ofeneinlauf mit Vorschalttechnik akzeptiert. Hier ist das Leichtgut mit einer geringeren Aufbereitungstiefe aufzubereiten. Die Einhaltung der chemischen Mindestanforderungen wird bei geringerer Aufbereitungstiefe jedoch problematisch (siehe hierzu Tabelle 5-4, Abschnitt 5.1.4). Sofern eine Stoffstromtrennung in Richtung qualitativ anspruchsvoller Produkte ausgelegt wird, muss mit einer Beschränkung des möglichen Produktausbringens gerechnet werden. Je länger die erforderlichen Prozessketten ausfallen, umso geringer wird die Produktausbeute. Wenn ein Ersatzbrennstoff mit höchsten Qualitätsanforderungen produziert werden soll, ist mit einem ähnlichen Produktausbringen zu rechnen wie im Fall der produktorientierten Stoffstromtrennung mit dem Ziel werkstofflich verwertbarer Kunststoffe.

Da sich der Ersatzbrennstoff maßgeblich aus den im Deponat enthaltenen Kunststoffen zusammensetzt, schließt sich eine Verfahrenskombination von Kunststoffsortierung und hochwertigem Ersatzbrennstoff aus. Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass eine produktorientierte Stoffstromtrennung auf das Ziel Ersatzbrennstoff mit geringsten qualitativen Ansprüchen ausgerichtet werden sollte. Nur in diesem Fall kann mit technisch sehr begrenztem Aufwand (ggf. bereits nach der Voranreicherung) ein hoher Massenanteil des Deponats in den energetischen Verwertungsweg überführt werden.



#### **4.2.3. Erkenntnisse zum Produkt „Schwergut“**

Der in der Vorkonditionierung und Voranreicherung erzeugte Stoffstrom Schwergut (SG) aus der ballistischen Separation beläuft sich auf bis zu ca. 10 % des Gesamt-massenstroms. Das Schwergut ist aufgrund dieser Zusammensetzung weder für eine direkte Ablagerung noch für eine thermische Behandlung geeignet.

Die produktorientierte Stoffstromtrennung wurde in einer Anlage zur Sortierung von Gewerbeabfall überwiegend mittels manueller Klaubung vorgenommen. Als verwertbare Materialbestandteile finden sich hier z. B. ca. 10 % Hartkunststoffe, ca. 20 % Holz und bis ca. 10 % Metalle (Fe und NE) neben dem Hauptbestandteil Mineralik von über 45 %.

Für diese weitergehende Trennung von Schwergut aus der ballistischen Separation steht in der Regel keine standardisierte Aufbereitungstechnologie zur Verfügung. Spezialisierte Prozesse führen zudem weder zu direkt ablagerungsfähigen noch zu stofflich verwertbaren Produkten.

## 5. Behandlung der Grobfraktion > 60 mm

*Martin Rotheut, Peter Quicker, Boris Breitenstein, Daniel Goldmann, Michael Krüger, Anja Maul, Thomas Pretz*

Das Kapitel 5 beschäftigt sich mit der energetischen und stofflichen Verwertung der bei der Vorkonditionierung und Stoffstromtrennung erhaltenen Grobfraktion (Kapitel 4).

Zunächst werden in Abschnitt 5.1 die Möglichkeiten zur energetischen Verwertung in unterschiedlichen thermischen Anlagen – MVA, EBS-Kraftwerk und Zementwerk – betrachtet. Abschnitt 5.2 befasst sich mit der pyrolytischen Metallrückgewinnung aus metallangereicherten Schwerfraktionen. In Abschnitt 5.3 werden konventionelle und aufwändigere Behandlungsmethoden für die Rückstände aus den Monoverbrennungsanlagen, MVA und EBS-Kraftwerk, diskutiert. Die zu betrachtenden Möglichkeiten zur stofflichen Nutzung der gewonnenen Kunststoffe werden in Abschnitt 5.4 thematisiert.

### 5.1. Energetische Verwertung

#### 5.1.1. Eignung

Durch eine mechanische Vorbehandlung des Aushubmaterials können Fraktionen mit unterschiedlichen Zusammensetzungen, Brennstoffqualitäten und -eigenschaften generiert werden. Zur Beurteilung der Eignung einer Fraktion für die energetische Verwertung sollte zunächst eine Untersuchung der brennstoffrelevanten Parameter erfolgen. Um möglichst repräsentative Ergebnisse zu gewährleisten, wird die Beprobung der relevanten Fraktionen in Anlehnung an die LAGA Richtlinie PN 98 empfohlen. Aus den gewonnenen Mischproben können schließlich Laborproben generiert werden, welche die Basis für die Untersuchung der Brennstoffeigenschaften bilden. Die Materialcharakterisierung sollte die nachfolgend dargestellten Parameter umfassen:

- Korngrößenverteilung
- Schüttdichte
- Wassergehalt
- Aschegehalt
- Gehalt flüchtiger Bestandteile
- Brennwert / Heizwert
- Elementare Zusammensetzung (C, H, N, S, Cl)
- Schwermetallgehalte (Hg, Cd, Tl, Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn).

Basierend auf den Ergebnissen der Materialcharakterisierung kann anschließend bewertet werden, welche thermischen Prozessoptionen bestehen. Wird eine thermische Prozessvariante in Betracht gezogen, so müssen die spezifischen Anforderungen der Variante im Detail geprüft werden. Die empfohlene Vorgehensweise ist in Abbildung 5-1 als Übersicht dargestellt. Die bisherigen Forschungsergebnisse zeigen, dass die in der Abbildung dargestellten thermischen Prozessoptionen für Fraktionen aus dem Deponierückbau grundsätzlich in Frage kommen, wobei unterschiedlich hoher Aufbereitungsaufwand erforderlich wird.



**Abbildung 5-1:** Optionen zur energetischen Verwertung von Fraktionen aus dem Deponierückbau

Durch die in der mechanischen Vorbehandlung eingestellte obere Korngröße wird bereits festgelegt, ob der Einsatz in thermischen Anlagen wie beispielsweise Müllverbrennungsanlagen (MVA; bei im Regelfall praktizierter Kraft-Wärme-Kopplung als Müllheizkraftwerk (MHKW) bezeichnet), Ersatzbrennstoffkraftwerken oder Zementwerken möglich ist. Eine Verwertung grobkörniger Materialien (> 300 mm) kann in Müllverbrennungsanlagen oder Ersatzbrennstoffkraftwerken mit Rostfeuerung erfolgen. In Tabelle 5-1 sind zur groben Einteilung der Materialeignung Anforderungen verschiedener thermischer Anlagen aus verschiedenen Literaturquellen dargestellt. Nach dem heutigen Stand der Technik sind Ersatzbrennstoffkraftwerke allerdings bei im Wesentlichen gleichen Parametern zu betreiben wie MVA, da vergleichbare Technik verwendet wird.

Ergänzend dazu dürfen in allen genannten Anlagen nur Fraktionen eingesetzt werden, die keine sperrigen Grobstücke enthalten (z. B. große Metallteile, Betonblöcke). In Müllverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken ist darüber hinaus der Anteil inerter Stoffe, wie beispielsweise Böden und Sande, zu begrenzen (itad 2015).

Für Wirbelschichtfeuerungen müssen die Einsatzmaterialien in der Regel auf eine Korngröße von < 150 mm zerkleinert werden (Thiel 2013). Der Einsatz im Hauptbrenner von Zementwerken erfordert meist geringere Körnungen, unterhalb von 25 mm.

**Tabelle 5-1:** Brennstoffanforderungen thermischer Anlagen<sup>5</sup>

Parameter	Einheit	MVA	EBS-Kraftwerke	Zementwerke
Korngrößenverteilung	mm	< 2.500 <sup>6</sup>	< 500 <sup>7</sup>	< 25 (< 300 <sup>8</sup> )
Wassergehalt	M.-%	< 60	< 40	< 15 (< 25 <sup>9</sup> )
Aschegehalt		< 30	< 36	< 30, unbegrenzt <sup>10</sup>
Chlorgehalt		< 4	< 2,5	< 1
Schwefelgehalt		< 3	< 1,7	< 1
Heizwert	MJ/kg	8 – 17	10 – 18	13 – 26 <sup>9</sup>

Quelle: Tietze 2010, CEMEX 2014, Thiel 2013, Achternbosch, Bräutigam 2000, Pomberger, Sarc 2014, itad 2015, ZVHO 2015

In den nachfolgenden Unterkapiteln sind die Optionen zur energetischen Verwertung des Materials detaillierter erläutert. Neben den jeweiligen spezifischen Anforderungen an die Einsatzmaterialien werden in Frage kommende Anlagen beschrieben und Empfehlungen zum Materialeinsatz gegeben.

### 5.1.2. Müllverbrennungsanlage

Wie bereits aus Tabelle 5-1 ersichtlich ist, werden an die Brennstoffqualität in MVA die geringsten Anforderungen gestellt. Daher bietet sich in diesen Anlagen insbesondere der Einsatz von weniger aufwändig aufbereitetem Material an.

#### Verfahrensbeschreibung

MVA sind speziell für die Behandlung von Siedlungsabfällen sowie Gewerbeabfällen unterschiedlicher Art ausgelegt. Zur Abfallannahme und Zwischenlagerung verfügen die Anlagen über einen Müllbunker. Von dort aus werden die Abfälle über ein robustes Zuführsystem, bestehend aus Polypgreifer und groß dimensioniertem Falltrichter, in die Feuerung aufgegeben. Ein unter dem Trichter angeordneter Dosierstößel führt den Abfall dem Rost zu, auf dem das Material bei Temperaturen von über 1.000 °C verbrannt wird. Häufig eingesetzte Rostarten sind Vorschubroste, Gegenlauf-Überschubroste, Walzenroste und Rückschubroste.

Die bei der Verbrennung entstehenden heißen Rauchgase durchströmen einen Wasserrohrkessel. Durch diesen wird die freigesetzte Wärme auf den Wasser-Dampf-Kreislauf übertragen und letztlich beispielsweise als Prozessdampf, Strom oder Fernwärme genutzt. Die abgekühlten Rauchgase werden nachfolgend einer Rauchgasrei-

<sup>5</sup> Literaturwerte. In der Praxis sind MVA und EBS-Kraftwerke mit Rostfeuerung häufig baugleich und damit ähnliche Brennstoffanforderungen gegeben.

<sup>6</sup> für Anlagen mit Vorzerkleinerung

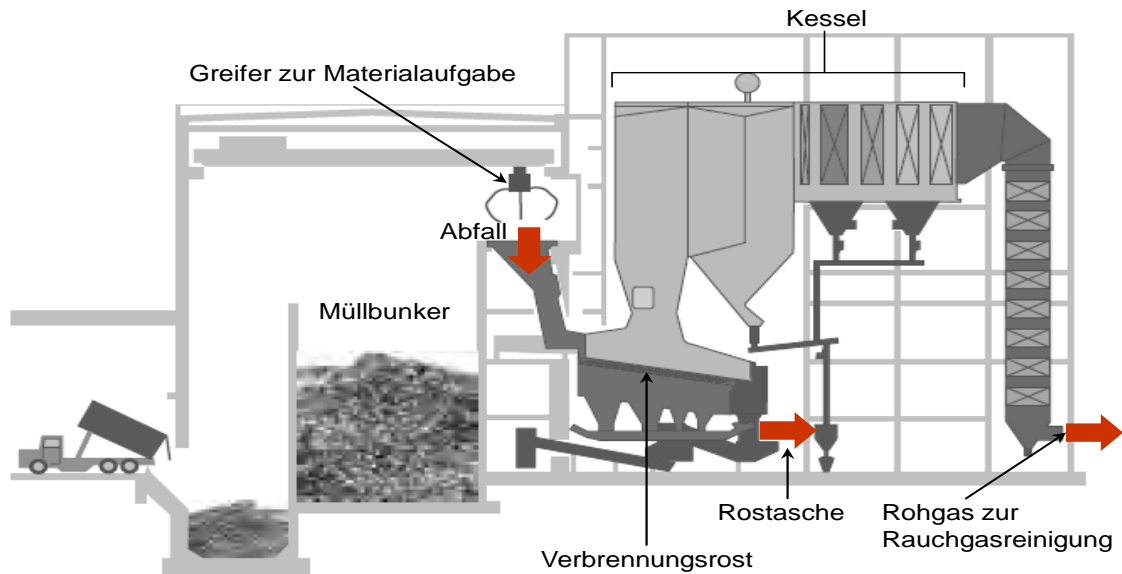
<sup>7</sup> EBS-Kraftwerke mit Verbrennungsrast

<sup>8</sup> gilt für spezielle Materialaufgabesysteme

<sup>9</sup> abhängig von Einsatzart (Niederkalorik für Ofeneinlauf oder Hochkalorik für Hauptbrenner)

<sup>10</sup> gilt für Zementwerk mit spezieller Vorschaltanlage

nigungsanlage zugeführt und verlassen den Kamin als Reingas. Die zurückbleibende Rostasche (ca. 25 M.-% des Einsatzmaterials) wird ausgetragen und kann nach der Abtrennung der enthaltenen Metalle und Fraktionierung zum Teil als Baustoff genutzt werden. In Abbildung 5-2 ist die Prinzipskizze einer MVA dargestellt.



**Abbildung 5-2:** Vereinfachte Prinzipskizze einer Müllverbrennungsanlage in Anlehnung an Baumgarte (2015)

Zur Rauchgasreinigung kommen trockene, konditioniert trockene und nasse Verfahren zum Einsatz. Die Abscheidung schädlicher, saurer Komponenten aus dem Rauchgas (z. B. Chlorwasserstoff und Schwefeldioxid) wird je nach Verfahren durch die Additive Natriumhydrogencarbonat, Trockenkalk oder Kalkmilch realisiert. Zur Abscheidung von Stickoxiden werden die Additive Ammoniak oder Harnstoff zugegeben. Schwermetalle und toxische organische Schadstoffe (z. B. Dioxine und Furane) werden an Aktivkohle oder –kokse gebunden. Im Rauchgas enthaltene Stäube und die beladenen Adsorbentien werden in Gewebe- oder Elektrofiltern abgeschieden.

Durch die konstruktive Gestaltung und die flexible Steuerung der Rauchgasreinigungsanlagen können hohe Schadstofffrachten aus dem Rauchgas sicher abgeschieden werden.

### Spezifische Anforderungen

Zur Beurteilung der Einsetzbarkeit von Fraktionen aus dem Deponierückbau in MVA können die in Tabelle 5-2 angeführten spezifischen Annahmekriterien zur Orientierung herangezogen werden.

**Tabelle 5-2:** Anforderungen und Konzentrationsbeschränkungen für den Einsatz von Abfällen in MVA

Parameter	Einheit	Wertebereich
Korngröße	mm	< 1.000 x 1.000 x 100 (< 2.500 x 2.500 x 200 <sup>11</sup> )
Schüttdichte	kg/m <sup>3</sup>	Keine Vorgabe
Wassergehalt	M.-%	60
Aschegehalt		30 <sup>12</sup>
Chlorgehalt		4
Schwefelgehalt		3
Heizwert	MJ/kg	8.000 – 17.000
Antimon	mg/kgTS	2.500
Arsen		1.000
Blei		5.000 <sup>13</sup>
Brom		50
Cadmium		100
Chrom		4.000
Kupfer		15.000 <sup>12</sup>
Nickel		2.500
Quecksilber		50
Thallium		1.000
Iod		50
Selen		2.500
Zink		25.000 <sup>12</sup>
Zinn		1.000
Vanadium		100
PAK		5.000
PCB		50
PCT		50

Quelle: SRS EcoTherm 2008, itad 2015, ZVHO 2015, SWD-AG 2015, MHKW Rothensee 2015, Sutco 2015

<sup>11</sup> für Anlagen mit Vorzerkleinerer

<sup>12</sup> Aschegehalte > 30 M.-% möglich, unterliegen jedoch Sonderprüfung.

<sup>13</sup> Bei Überschreitung eines Parameters muss die Summe aus Pb, Cu und Zn unterhalb von 45.000 mg/kg liegen.

Darüber hinaus sind individuelle Annahmekriterien gemäß der erteilten Genehmigungsbescheide zu beachten. Aus der Tabelle geht hervor, dass der Aschegehalt der Abfälle nach den Annahmekriterien in der Regel unterhalb von 30 M.-% liegen soll. Ein Grund für diese Anforderung ist die angestrebte selbständige Brennbarkeit der Abfälle. Bei Aschegehalten oberhalb von 30 M.-% muss brennstoffanalytisch geprüft werden, ob diese gegeben ist.

Die angegebene obere Kantenlänge von ca. 2.500 mm der Einsatzmaterialien gilt für Anlagen, die über mechanische Aggregate zur Vorzerkleinerung verfügen. Ohne eine Abfallvorzerkleinerung darf die obere Kantenlänge 1.000 mm nicht überschreiten (ZVHO 2015).

### Ergebnisse und Empfehlungen

Der Einsatz von deponiestämmigen Abfallfraktionen in Müllverbrennungsanlagen erscheint grundsätzlich möglich. Die vorhandenen Anlagen sind robust ausgeführt und verfügen alle über ausgereifte und unempfindliche Systeme zur Brennstoffzufuhr.

Im Rahmen eines großtechnischen Versuches wurde ein Ersatzbrennstoff aus Deponat in einer MVA als Monocharge eingesetzt. Es konnte ein Anstieg des Gehaltes an Chlorwasserstoff im Rohgas um den Faktor 2,7 sowie ein Schwefeldioxid-Anstieg um den Faktor 2,2 festgestellt werden. Die Rauchgasreinigungsanlagen konnten die auftretenden Schadstofffrachten im Rauchgas dennoch sicher abscheiden. Der Additivverbrauch stieg um den Faktor 1,8. Aus den Materialeigenschaften resultierten Schwankungen der Frischdampfproduktion. Ein weiterer Versuch mit unvorbehandeltem Aushubmaterial hat gezeigt, dass eine hohe Zumischung von Frischmüll für den erfolgreichen Einsatz zwingend erforderlich ist.

Empfohlen wird daher im Fall des Einsatzes aufbereiteter Fraktionen die Einhaltung einer ausreichenden Mischung mit Frischmüll (Mischungsverhältnis Deponat zu Frischmüll 1:1). Für den Einsatz unvorbehandelten Materials wird die Einhaltung einer hohen Frischmüllzumischung von mindestens 10:1 vorgeschlagen. Basierend auf den Versuchsergebnissen wird darüber hinaus die Nutzung einer Anlage mit gut regelbarem Rostsystem, wie beispielsweise Vorschub- oder Rückschubrost, empfohlen.

Hinweis: Für organisch belastete Feinfraktionen aus rückgebautem Deponiematerial kann eine direkte thermische Behandlung der Fraktion in Erwägung gezogen werden. Diese kann gemeinsam mit Grobfractionen in einer MVA vorgenommen werden. Erfolgt die Mischung über den Müllbunker, können sich die Zumischungsverhältnisse an den Erfahrungen der Mitverbrennung von Klärschlamm orientieren.

### **5.1.3. Ersatzbrennstoffkraftwerke**

Die Verwertung aufbereiteter Fraktionen aus Rückbaumaterial stellt ebenfalls eine mögliche Variante zur energetischen Verwertung von Deponat dar.

### Verfahrensbeschreibung

Ersatzbrennstoffkraftwerke sind für die Verbrennung von aufbereiteten Abfallfraktionen entwickelt worden. Die Anlagen verfügen entweder über Rost- oder über Wirbelschichtfeuerungen. Für den Einsatz in Wirbelschichten sind umfangreich aufbereitete Abfallfraktionen erforderlich, da die Brennstoffe in der Feuerung im fluidisierten Zustand verbrannt werden (Thiel 2013).

**Tabelle 5-3:** Bandbreite möglicher Konzentrationsbeschränkungen sowie Anforderungen für den Einsatz in Ersatzbrennstoffkraftwerken<sup>14</sup>

		Rostfeuerung	Wirbelschicht	
Parameter	Einheit	Wertebereich	Wertebereich	
Korngröße	mm	< 300 <sup>15</sup> , < 500 x 100 x 100	< 250	
Schüttdichte	kg/m <sup>3</sup>	0,15 - 0,5 <sup>15</sup>	0,08 - 0,25 <sup>16</sup> (0,2 – 0,6 <sup>17</sup> )	
Wassergehalt	M.-%	25 - 40	7 - 38 <sup>16</sup> (10 - 30 <sup>17</sup> )	
Aschegehalt		22 - 36	12 - 46 <sup>16</sup> (11 - 43 <sup>17</sup> )	
Chlorgehalt		2,5	0,9 (1 <sup>18</sup> )	
Schwefelgehalt		1,7	0,7 (1,4 <sup>18</sup> )	
Heizwert	MJ/kg	10 - 18	11 - 20 <sup>16</sup> (8,5 - 15 <sup>17</sup> )	
Antimon	mg/kgT S	850	60 <sup>18</sup>	
Arsen		30	13 <sup>18</sup>	
Blei		2.800	400 <sup>18</sup>	
Cadmium		107	26,5 <sup>16</sup> (10 <sup>17</sup> )	
Chrom		9.200	8.088 <sup>19</sup> (900 <sup>18</sup> , 250 <sup>17</sup> )	
Kupfer		37.100	850 <sup>18</sup>	
Mangan		850	350 <sup>18</sup>	
Nickel		400	200 <sup>18</sup>	
Quecksilber		7	0,8	
Thallium		40	8	
Vanadium		180	25 <sup>18</sup>	
Zinn		400	90 <sup>18</sup>	
Zink		150	6.250 <sup>16</sup> (1.875 <sup>17</sup> )	
Störstoffe		M.-%	Fe-/NE-Metalle < 0,5 <sup>15</sup>	6 (Fe-Metalle ≤ 1, NE-Metalle ≤ 0,6 <sup>17</sup> )

Quelle: Kriete 2002, Beckmann, Thomé-Kozmiensky 2005, Thomé-Kozmiensky 2005, Umweltamt Kiel 2005, Mrotzek et al. 2006, Thiel 2013

<sup>14</sup> Literaturwerte. In der Praxis sind MVA und EBS-Kraftwerke mit Rostfeuerung häufig baugleich und damit ähnliche Brennstoffanforderungen gegeben.

<sup>15</sup> Angabe für Energies-Anlagen

<sup>16</sup> Angabe für stationäre Wirbelschicht

<sup>17</sup> Angabe für rotierende Wirbelschicht

<sup>18</sup> Angabe für zirkulierende Wirbelschicht

<sup>19</sup> Summe Cr+Zn+Pb



Eine Sonderbauform stellen Ersatzbrennstoffkraftwerke nach dem Energös-Verfahren dar. Das Verfahrensprinzip beruht auf der gestuften Verbrennung des Brennstoffes, wodurch Stickoxid-Emissionen und die Rauchgasvolumenströme gering gehalten werden können. Auch für dieses Verfahren ist eine Aufbereitung des Einsatzmaterials obligatorisch.

Ersatzbrennstoffkraftwerke mit Rostfeuerungen können im Gegensatz zu Wirbelschichtfeuerungen deutlich weniger tief aufbereitete Brennstoffe einsetzen. Der Aufbau beziehungsweise die Funktionsweise von EBS-Kraftwerken mit Rostfeuerungstechnik ist mit Müllverbrennungsanlagen weitgehend identisch.

### Spezifische Anforderungen

Die wesentlichen Spezifikationen, welche eine Annahme von Einsatzmaterialien ermöglichen sind zusammenfassend in der nachfolgenden Übersichtstabelle dargestellt. Es sind die in der Literatur angegebenen Bandbreiten der relevanten Parameter für Rost- und Wirbelschichtfeuerungen angeführt. In der Literatur werden zum Teil unterschiedliche Schwermetall-Obergrenzen für die Materialannahme in EBS-Kraftwerken mit Rostfeuerung sowie für MVA angegeben (vgl. Tabelle 5-2 und Tabelle 5-3). Moderne EBS-Kraftwerke mit Rostfeuerung verfügen jedoch über vergleichbare Rauchgasreinigungsanlagen wie MVA (Schröder 2011). Daher kann jeweils der angegebene Höchstwert für beide Anlagentypen zur ersten Einschätzung der Materialeinsatzmöglichkeiten herangezogen werden. Die angegebenen Obergrenzen müssen im konkreten Fall erneut anlagenbezogen geprüft werden.

Die Tabelle verdeutlicht, dass der Einsatz von Material in Ersatzbrennstoffkraftwerken mit Wirbelschichtfeuerung deutlich höhere Ansprüche an die Brennstoffqualität stellt.

### **Ergebnisse und Empfehlungen**

Die Verbrennung von deponiestämmigen, aufbereiteten Ersatzbrennstoffen in einer Energös-Anlage sowie in einem Ersatzbrennstoffkraftwerk mit Rostfeuerung wurde in großtechnischen Versuchen untersucht. Die Monoverbrennung des Materials in der Rostfeuerung konnte problemlos realisiert werden. Die Frischdampfproduktion war unauffällig. Der Einsatz in der Energös-Anlage konnte nur durch eine Zumischung von EBS aus Frischmüll im Verhältnis 2:1 zum Deponat-EBS erfolgreich realisiert werden.

Für den Einsatz aufbereiteter, deponiestämmiger Ersatzbrennstoffe wird die Nutzung eines Ersatzbrennstoffkraftwerks mit regelbarem Rost (z. B. Vorschubrost) empfohlen. Auch für diese Anwendung wird die Zumischung von Frischmüll im Verhältnis 1:1 empfohlen. Hierdurch kann auch Schadstoffspitzen vorgebeugt werden. In Frage kommen deutschlandweit zahlreiche Anlagen, da sich überwiegend EBS-Kraftwerke mit Rostfeuerungstechnik in Betrieb befinden (24 Anlagen).

#### 5.1.4. Zementwerke

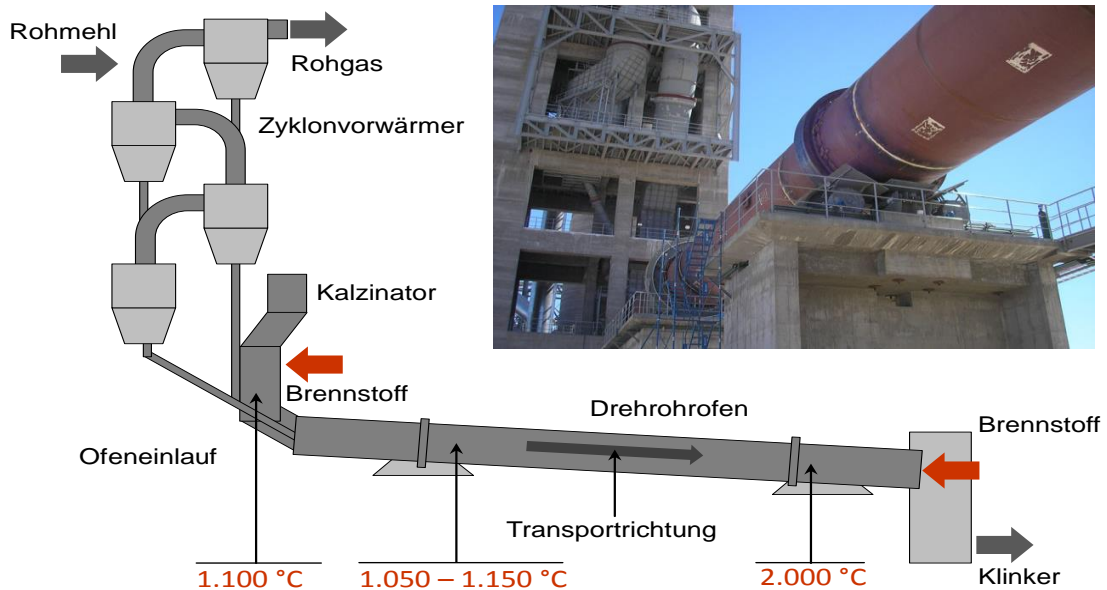
Die Verwertung aufbereiteter Fraktionen aus Rückbaumaterial stellt ebenfalls eine mögliche Variante zur thermischen Verwertung von Deponat dar, wenn es gelingt gleichbleibende Inputqualitäten qualitätsgesichert herzustellen. Es ergibt sich allerdings ein deutlich erhöhter Aufwand bei der Vorkonditionierung, Stoffstromaufbereitung und Nachzerkleinerung (siehe Kapitel 4).

##### Verfahrensbeschreibung

In Anlagen zur Herstellung von Zement kommen überwiegend Drehrohröfen in Verbindung mit Zyklonvorwärmern zum Einsatz (VDZ 2008). Dabei wird das Ofenrohmehl zunächst gemahlen und anschließend im oberen Bereich des Zyklonvorwärmers aufgegeben. Die aus dem Drehrohröfen aufsteigenden, heißen Rauchgase wärmen das Rohmehl vor. Anschließend tritt das Rohmehl in den Drehrohröfen ein und wird dort bei ca. 1.450 °C zu Klinker gebrannt. Eine vereinfachte Prinzipskizze eines Zementwerkes mit Zyklonvorwärmer, Kalzinator und Drehrohröfen ist in Abbildung 5-3 dargestellt (VDZ 2008).

Für den Klinkerbrennprozess müssen große Energiemengen (ca. 3,6 GJ je Tonne produziertem Klinker) in Form von Brennstoffen zugeführt werden. Zu diesem Zweck werden die Drehrohre mit Steinkohle, Braunkohle oder Schweröl über einen Brenner am Ofenauslass befeuert. Die bei der Verbrennung anfallenden Aschen werden in die Klinkermatrix eingebunden, sodass keine separaten Aschemengen anfallen (Braun 2001, VDZ 2008, VDZ 2012).

In Zementwerken können Ersatzbrennstoffe zur Substitution der genannten fossilen Brennstoffe verwendet werden. Feinkörnige hochkalorische abfallstämmige Brennstoffe können ebenfalls über den Ofenhauptbrenner aufgegeben werden (VDZ 2008, VDZ 2005). Bei einigen Anlagen können zusätzlich im Bereich des Ofeneinlaufs oder des Kalzinators Ersatzbrennstoffe zugegeben werden. Die Zugabe kann beispielsweise direkt über einen Brenner in den Ofeneinlauf oder indirekt über separate Vorschaltanlagen erfolgen. In Vorschaltanlagen kann der Brennstoff zunächst vergast oder vorverbrannt werden. Anschließend erfolgt die Verbrennung der generierten Gase im Kalzinator (VDZ 2005, Baier, Horix 2014).



**Abbildung 5-3:** Vereinfachte Prinzipskizze eines Zementwerkes

#### Spezifische Anforderungen

Bei einer Substitution des Regelbrennstoffes durch alternative abfallstämmige Brennstoffe kann in Abhängigkeit von deren Zusammensetzung eine Änderung der Verbrennungsbedingungen (z. B. verringerte Temperatur im Drehrohröfen) auftreten (Beckmann et al. 2009). Die Qualität des produzierten Klinkers kann durch diese Veränderungen beeinträchtigt werden. Darüber hinaus können gegebenenfalls enthaltene Schwermetalle wie z. B. Blei, Cadmium, Chrom, Nickel und Vanadium in den Klinker eingetragen werden und somit ebenfalls die Qualität beeinträchtigen (Flamme 2002).

Aus prozesstechnischer Sicht besonders problematisch ist der Eintrag von Chlor durch Ersatzbrennstoffe. In den Anlagen führen eingebrachte Chlorfrachten zur Ausbildung von Chlorid-Kreisläufen beziehungsweise einer Anreicherung von Chloriden im Bereich des Ofens und Wärmetauschers. Daraus resultieren schließlich Betriebsstörungen, verursacht durch die Bildung von Ablagerungen im Wärmetauscher und Korrosion (VDZ 2008, Braun 2001).

Aus diesem Grund gelten für abfallstämmige Einsatzstoffe umfangreiche Anforderungen hinsichtlich der mechanischen und chemischen Brennstoffeigenschaften. Die Anforderungen an speziell qualitätsgesicherte Sekundärbrennstoffe (SBS) für den Einsatz in Zementwerken müssen eingehalten werden. Sofern die erste Beurteilung der aus dem rückgebauten Deponiematerial gewonnenen Brennstoffe eine mögliche Eignung für den Einsatz in Zementwerken zulässt, muss die Einhaltung der Annahmekriterien gemäß Tabelle 5-4 im Rahmen einer Einzelfallbetrachtung geprüft werden. Da insbesondere der Chlorgehalt ein wichtiges Einsatzkriterium darstellt, werden vorgeschaltete Maßnahmen zu dessen Reduzierung empfohlen, wie beispielsweise eine Abtrennung von PVC.

Alle in der Tabelle angegebenen Werte sind lediglich als Bandbreite möglicher Annahmekriterien zu verstehen, da diese abhängig vom jeweiligen Aufbau des Zementwerkes stark variieren können. Die erforderliche Korngröße des Einsatzstoffes kann im Fall von Anlagen, die nicht über eine Vorschaltanlage zur Behandlung der Brennstoffe verfügen sowie pneumatische Fördersysteme einsetzen, unterhalb von 25 mm liegen.

Anlagen, die über Vorschaltanlagen wie z. B. eine dem Kalzinator vorgeschaltete Brennkammer verfügen, können Materialien mit deutlich höheren Korngrößen von < 300 x 300 x 20 mm annehmen (Baier, Horix 2014, TKIS 2015).

**Tabelle 5-4:** Bandbreite möglicher Anforderungen und Konzentrationsbeschränkungen für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen im Zementwerk

Parameter	Einheit	Niederkalorik Wertebereich	Hochkalorik Wertebereich
Korngröße	mm	< 25 x 25 x 1, < 300 x 300 x 20 <sup>20</sup>	< 25 x 25 x 1
Schüttdichte	kg/m <sup>3</sup>	300 - 500	300
Feuchte	M.-%	10 - 25	15
Aschegehalt		10 - 30	10
Chlorgehalt		0,8	1
Schwefelgehalt		0,5	1
Heizwert	MJ/kg <sup>21</sup>	13 - 17	20 - 26
Antimon	mg/kgTS	150	120
Arsen		13	20
Blei		300	350
Cadmium		9	10
Chrom		185	200
Cobalt		12	20
Kupfer		500	750
Mangan		600	600
Nickel		100	100
Quecksilber		1,2	1,5
Thallium		2	3
Vanadium		25	25
Zinn		70	700

Quelle: VDZ 2005, Tietze 2010, Baier, Horix 2014, Pomberger, Sarc 2014CEMEX 2014, Dyckerhoff 2015

Für den Einsatz des aufbereiteten Rückbaumaterials muss darüber hinaus geprüft werden, ob die langfristige Bereitstellung ausreichender Mengen sichergestellt werden kann. Weitere wesentliche Kriterien sind die Sicherstellung der Brennstoffqualität zur Einhaltung der in Tabelle 5-4 angegebenen Anforderungen sowie die Realisierung der Störstofffreiheit (z. B. Metallteile).

<sup>20</sup> Gilt für Anlagen mit Vorbrennkammer

<sup>21</sup> Angaben für analysenfeuchten Zustand

Die konstante Einhaltung der genannten Qualitätsanforderungen hat sich im Fall des durchgeführten Projektes als sehr schwierig erwiesen. Es wird daher empfohlen, im Rahmen der Materialcharakterisierung auftretende Schwankungen in der Bewertung der Einsatzfähigkeit des Materials zu berücksichtigen.

### Ergebnisse und Empfehlungen

Als grundsätzlich denkbar wird der Einsatz des Materials in Anlagen mit Vorschaltssystem zur Brennstoffbehandlung erachtet. Möglicherweise in Frage kommt beispielsweise eine vorgeschaltete Verbrennungs- oder Vergasungskammer im Verbund mit einem Kalzinator (Zementwerke Lägerdorf, Rüdersdorf). Da zu den Anlagen keine konkreten Erfahrungen bezüglich des Einsatzes aufbereiteter Fraktionen aus dem Deponierückbau bestehen, wird die Durchführung großtechnischer Vorversuche mit Materialchargen im Bereich von mindestens 100 bis 200 Tonnen empfohlen.

Basierend auf den bisherigen Forschungsergebnissen wird vom Einsatz des Materials in Zementwerken, die keine Vorschaltssysteme verwenden und die abfallstämmige Brennstoffe pneumatisch fördern, abgeraten. Die Ergebnisse durchgeführter großtechnischer Versuche haben gezeigt, dass trotz der Einhaltung der geforderten Materialkörnung zum Teil große Probleme im Bereich der Materialförderung in Form von Stopfern und Blockaden auftreten können. Zudem haben hohe Chlorwerte zu Problemen geführt, die in weiteren Untersuchungen auf ihre Reproduzierbarkeit hin verifiziert werden müssten.

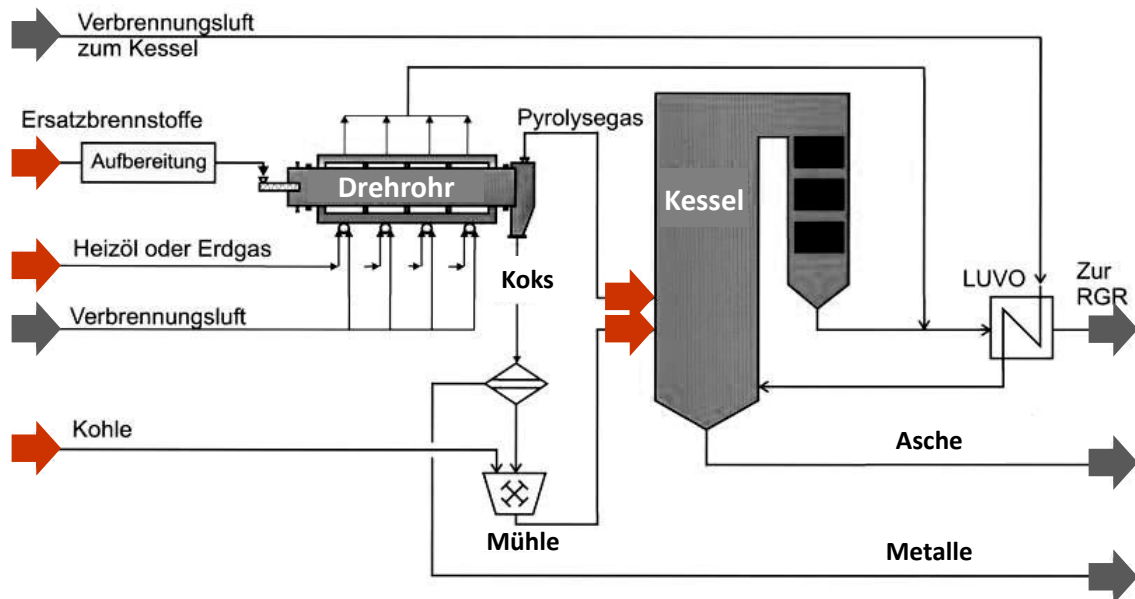
## **5.2. Aufbereitung von Metallfraktionen mittels Pyrolyse**

Aus der mechanischen Aufbereitung hervorgehende Metallfraktionen sind gemäß den bisherigen Erkenntnissen häufig stark mit Kunststoffen und sonstigen organischen Anhaftungen verunreinigt bzw. sogar fest verbunden. Eine effektive mechanische Aufbereitung oder Direktvermarktung kommt daher oft nicht in Frage. Als Lösungsansatz kann die pyrolytische Aufbereitung des Materials in Betracht gezogen werden. Die Anwendung der Pyrolyse zur Metallrückgewinnung stellt jedoch einen relativ neuen Ansatz dar. Informationen zum Betrieb derartiger Anlagen mit Metallfraktionen liegen in der Literatur aktuell noch kaum vor, jedoch wurden bereits umfangreiche Untersuchungen im Technikumsmaßstab durchgeführt (Rotheut et al. 2015).

Die im Vorfeld der thermischen Behandlung empfohlene Beprobung wird auch für metallangereicherte Fraktionen vorgeschlagen. Anhand der im Unterkapitel beschriebenen spezifischen Anforderungen kann schließlich die Anwendungsmöglichkeit geprüft werden.

### Verfahrensbeschreibung

Pyrolyseanlagen zur Behandlung von Abfällen sind häufig als Drehrohröfen ausgeführt. Die Aufgabematerialien werden in eine direkt oder indirekt beheizte Drehtrommel aufgegeben und durch die Drehbewegung gefördert. Durch die pyrolytische Behandlung unter Sauerstoffausschluss werden organische Komponenten zersetzt und in die flüchtige Phase überführt. Zurück bleiben ein Pyrolysekoks sowie inerte Komponenten. Die entstandenen Gase sind brennbar und können beispielsweise zur Prozessbeheizung verwendet werden. Zur Unterstützung der Beheizung der Pyrolysetrommel kann Heizöl oder Erdgas verwendet werden (Hauk, Spindeldreher 2004).



**Abbildung 5-4:** Vereinfachte Prinzipskizze einer Drehrohrpyrolyseanlage für Abfälle in Anlehnung an Hauk, Spindeldreher (2004)

Bezogen auf den Einsatz der Metallfraktion verbleibt nach Zersetzung der organischen Störstoffe an den Metallen lediglich Pyrolysekoks. Dieser kann durch eine einfache mechanische Beanspruchung effektiv abgetrennt und gegebenenfalls energetisch verwertet werden. Somit wird eine Rückgewinnung der Metalle in hoher Qualität ermöglicht.

#### Spezifische Anforderungen

Eine erfolgreiche Anwendung der Drehrohrpyrolyse ist mit hohen spezifischen Behandlungskosten verbunden. Daher ist eine wesentliche Anforderung an das Eingangsmaterial, ein ausreichend hohes Metallinventar, zur Deckung der anfallenden Behandlungskosten bereitzustellen. Insbesondere der NE-Metallgehalt der Fraktion ist wirtschaftlich relevant. Zu behandelnde Fraktionen sollten über einen NE-Metallgehalt von mindestens 30 M.-% verfügen.

Der Anteil organischer Komponenten sollte nicht unterhalb von 10 M.-% liegen, um ausreichende Gasmengen für die Prozessbeheizung zu erzeugen. Darüber hinaus sind die Schwermetallgehalte der Fraktionen zu beachten. Hohe Gehalte bestimmter Schwermetalle im Edukt können die Qualität des Pyrolysekokes beeinträchtigen. Ist dies der Fall, steigen die Entsorgungskosten für den Pyrolysekoks an. Die Korngröße der Eingangsmaterialien sollte aus Gründen der Materialförderung unterhalb von 300 mm liegen (Quicker et al. 2014).

#### Ergebnisse und Empfehlungen

Anhand der durchgeführten Technikumsversuche kann davon ausgegangen werden, dass eine Metallrückgewinnung aus deponiestämmigen Metallfraktionen durch Drehrohrpyrolyse möglich ist. Aktuell bestehen in Deutschland nur wenige Anlagen, die für eine derartige Anwendung in Frage kommen. Bei Bedarf sollten zunächst die Kapazitäten der vorhandenen Anlagen geprüft werden. Für den Neubau von Anlagen muss die langfristige Verfügbarkeit der Metallfraktionen in gleichbleibender Qualität sichergestellt werden.

## **5.3. Behandlung von Rückständen aus der thermischen Behandlung**

### **5.3.1. Eignung**

Es ist davon auszugehen, dass die bei der thermischen Behandlung von deponiestämmigen Brennstoffen entstehenden Verbrennungsrückstände, insbesondere der Massenhauptstrom, die sogenannten Müllverbrennungs- und Ersatzbrennstoffkraftwerksrostaschen (MVA-/EBS-Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken), in bestehenden dezentralen Anlagen behandelt werden können (vgl. Abschnitt 5.1). In der Regel werden in diesen industriellen Anlagen nach dem Stand der Technik unterschiedliche trockenmechanische Verfahren zur konventionellen MVA-Rostaschenaufbereitung genutzt (Alwast, Riemann 2010).

In Abhängigkeit von der Auslegung der Anlagen, welche für die Aufbereitung der MVA-Rostaschen genutzt werden, nehmen die Behandlungstiefe und die Qualität der rückgewonnenen Wertstoffe mit sinkender Korngröße ab. Bei einfachen und noch nicht mit neuester Technik ausgerüsteten Anlagen kann der untere Siebschnitt, unterhalb dessen keine Sortierung mehr erfolgt, bei 6 mm, in Stand der Technik Anlagen bei 4 mm, bzw. 3 mm und in den modernsten Anlagen bei 2 mm liegen (Lukas et al. 2008, Grünbein et al. 2015).

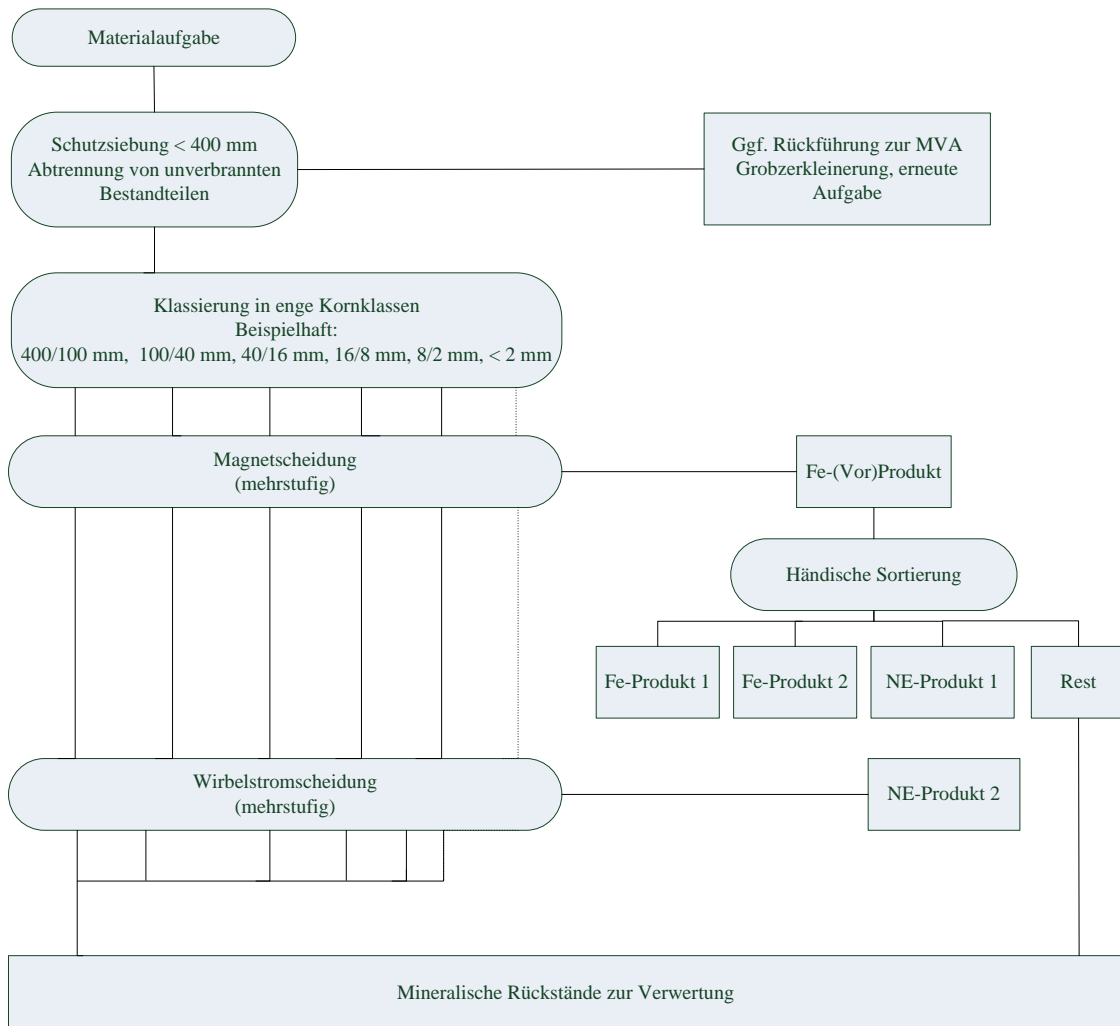
Da die Abtrennung der Wertmetalle in Fraktionen < 6 mm nur unvollständig und < 2 mm derzeit nicht erfolgt, sind zur weitergehenden Aufbereitung der feinkörnigen Bestandteile neue Verfahrensansätze wie z. B. das RENE-Verfahren (Breitenstein et al. 2013) anwendbar. Diese Verfahren ermöglichen eine NE-Metallrückgewinnung aus den feinkörnigen Rückständen vorgeschalteter Rostaschenaufbereitungsanlagen.

### **5.3.2. Konventionelle Rostaschenaufbereitung**

Moderne MVA-Rostaschenaufbereitungsanlagen arbeiten mit klassischer trockenmechanischer Trenntechnik (Siebung, Sichtung, konventionelle Magnet- und Wirbelstromscheidung). Die dabei entstehenden Metall- und Mineralikfraktionen werden größtenteils in metallurgischen und bautechnischen, meistens deponiegebundenen Anwendungen verwertet (Deike et al. 2012, Grünbein et al. 2015).

#### Verfahrensbeschreibung

Der prinzipielle Aufbau einer solchen Aufbereitungsanlage wird in Abbildung 5-5 dargestellt.



**Abbildung 5-5:** Schematischer Aufbau einer Anlage zur MVA-Rostaschenaufbereitung

Das Fließbild beschreibt eine Anlage, welche mit konventionellen Aufbereitungstechniken große Anteile der enthaltenen Metalle zurückgewinnen kann.

Ähnlich zum beschriebenen Verfahrensließbild wurden die im Rahmen des TönsLM-Projektes erzeugten Rückstände der Stufen zur energetischen Verwertung mit den beschriebenen Verfahren aufbereitet und dabei unterschiedliche Fe- und NE-Konzentrate sowie mineralische Rückstände zur weiteren Verwertung erzeugt.

#### Spezifische Anforderungen

Bei der Aufbereitung der in Stufen zur energetischen Verwertung erzeugten Rückstände wurden unter Einsatz konventioneller Technik im Technikumsmaßstab keine Schwierigkeiten festgestellt. Dabei wurden insgesamt 5 Verbrennungsrückstände untersucht, welche in Großkraftwerken bzw. Verbrennungsanlagen (MVA Hannover, Energios-Anlage Minden, Energieanlage Bernburg) als Rückstände der Verbrennung entstanden sind sowie 10 weitere Rückstände, welche bei der energetischen Verwertung von deponiestämmigen Brennstoffen in Technikumsfeuerungsanlagen erzeugt wurden.

Es ist davon auszugehen, dass die Aufbereitung der Verbrennungsrückstände in bestehenden dezentralen Anlagen, welche mit der beschriebenen Technik arbeiten,



durchgeführt werden kann, sofern die Kapazitäten für die anfallenden Mengen vorhanden sind.

In gleicher Weise wurden auch alte, abgelagerte MVA-Rostaschen aufbereitet (MVA-Rostaschendeponie Offenbach, 10 Jahre zwischengelagerte Rostaschen der TRV Buschhaus in Schöningen). Diese Untersuchungen führten zu ähnlichen Ergebnissen.

### Ergebnisse und Empfehlungen

Bei der Aufbereitung von MVA-Rostaschen, welche aus deponiestämmigen Brennstoffen stammen oder aus alten Rostaschedeponien, kann davon ausgegangen werden, dass gewisse Mengen an Fe- und NE-Bestandteilen auch im größeren Kornbereich separiert werden können. Die separierten Metallmengen und Qualitäten sollten mit denen aus der Aufbereitung „frischer“ MVA-Rostaschen vergleichbar sein. Exemplarisch werden im Weiteren die Ergebnisse der Aufbereitung zweier unterschiedlicher MVA-Rostaschen beschrieben.

In den Untersuchungskampagnen, die die Grundlagen für die Erstellung des Leitfadens bildeten, wurden Rückstände einer energetischen Verwertung deponiestämmiger Materialien und Ersatzbrennstoffe aus der MVA-Hannover untersucht. Die bei der jeweiligen Verbrennung entstehenden MVA-Rostaschen wurden analog dem in Abbildung 5-5 beschriebenen Verfahren aufbereitet.

Diese MVA-Rostaschen sind von der Entstehung her als „frische“ MVA-Rostaschen einzuordnen. Der genutzte Brennstoff wurde hingegen aus Materialien erzeugt, welche z. T. ein Alter von > 16 Jahren aufweisen und auf der Deponie „Pohlsche Heide“ abgelagert waren. In Tabelle 5-5 werden separierte Metallmengen aus unterschiedlichen Herkunftsbereichen dargestellt.

**Tabelle 5-5:** Übersicht der aus unterschiedlichen MVA-Rostaschen separierten Metallmengen

Bezeichnung	deponie- stämmiger EBS	Frischmüll: Deponat (10:1)	(Alwast, Riemann 2010)	(Deike et al. 2012)	(Kuchta et al. 2015)
Massenausbringen in %					
<b>Fe-Fraktion</b>	7,08	9,12	7,27	7,27	7,7
<b>NE-Fraktion</b>	0,61	0,72	0,67	0,8	1,3
<b>Rückstand (Gesamt)</b>	92,31	90,16	92,06	91,93	91,0

Insgesamt ist zu erkennen, dass sich die separierten Metallmengen im Wesentlichen nicht von den in industriellen Anlagen separierten Metallmengen aus MVA-Rostaschen von Frischmüll unterscheiden.

Um das Metallausbringen aus den untersuchten Stoffströmen zu verbessern, wurden weitergehende Verfahren, die eine höhere Aufbereitungstiefe besitzen, zum Einsatz gebracht. Bei diesen Verfahren handelt es sich jedoch mangels bisheriger industrieller Umsetzung nicht um Stand-der-Technik-Anlagen, sondern um Verfahren, die den Stand der Forschung abbilden.

### 5.3.3. Weitergehende Aufbereitungsverfahren

Eine weitergehende Aufbereitung von MVA-Rostaschen kann mit zwei Zielrichtungen durchgeführt werden. Zum einen dienen diese Verfahren der Verbesserung des Elutionsverhaltens und der Senkung der Salzfracht durch Waschen entweder direkt im Nass-Entschlacker oder aber in dezentralen Aufbereitungsanlagen. Zum anderen wird eine Erhöhung der Metallausbeute bei gleichzeitiger Verringerung der verbleibenden Metallfracht in der mineralischen Restfraktion angestrebt. Da bei den Rostaschen aus deponiestämmigen Materialien in bisherigen Untersuchungen keine Überschreitungen von Elutionsgrenzwerten festgestellt wurden, liegt der Fokus auf einer weitergehenden Metallrückgewinnung.

Bei Verfahren zur Verbesserung der Metallrückgewinnung sind zwei Ansätze zu unterscheiden. Einerseits wird versucht, durch den Einsatz weiterer Aggregate, z. B. von speziellen Sichteinheiten, wie dem INASHCO-Modul oder von Sensorsortierern, das Metallausbringen im Grobkornbereich zu verbessern (Grünbein et al. 2015). Andererseits wird versucht, den Korngrößenbereich in welchem sortiert wird, weiter nach unten zu verschieben und somit das Metallausbringen im Feinkornbereich zu verbessern (Kersting 2015).

Insbesondere mit den feinkörnigen Fraktionen, die bisher ohne weitere Aufbereitung einer direkten Verwertung im Deponiebau zugeführt werden, gehen dem Wirtschaftskreislauf große Mengen an Wertmetallen verloren.

Zur Metallrückgewinnung aus den feinkörnigen Fraktionen der deponiestämmigen Verbrennungsrückstände können neuentwickelte Ansätze wie das RENE-Verfahren eingesetzt werden, welches speziell für feinkörnige Müllverbrennungsrostaschen < 6 mm bzw. < 2 mm entwickelt wurde. Mit solchen Verfahren lassen sich dissipativ verteilte Metalle aus MVA-Rostaschen zurückgewinnen, wobei der Fokus auf den enthaltenen Kupfer- und Aluminiumfrachten liegt (Breitenstein et al. 2013). Diese Verfahren wurden zwar bislang noch nicht industriell umgesetzt, es werden jedoch bei einigen Prozessauslegungen ausschließlich am Markt verfügbare Aggregate verwendet, welche für eine industrielle Umsetzung dimensioniert sind.

Das Kornband < 6 bzw. < 2 mm der in Tabelle 5-5 aufgeführten Rostaschen sowie der abgelagerten Rostaschen aus Offenbach und Schöningen wurden in den Untersuchungen, die die Grundlage für den Leitfaden bilden, mit dem RENE-Verfahren aufbereitet. Dabei konnten große Teile der enthaltenen Wertmetalle zurückgewonnen werden (Abbildung 5-6).

Die Eignung des Verfahrens zur Aufbereitung von deponiestämmigen Verbrennungsrückständen und abgelagerten MVA-Rostaschen konnte dabei gezeigt werden (Breitenstein et al. 2015).



**Abbildung 5-6:** Kupfer-Aluminium-Mischkonzentrat der Feinkornaufbereitung

#### Ergebnisse und Empfehlungen

Im Rahmen der Untersuchungen zur Rückgewinnung von Metallen konnten keine Einschränkungen bei der Aufbereitung mit dem RENE-Verfahren im Technikumsmaßstab festgestellt werden. Analog zur Aufbereitung mittels konventioneller Technik der grobkörnigen Fraktionen, konnte auch die Metallrückgewinnung aus den feinkörnigen Fraktionen erfolgreich durchgeführt werden. Einzig gilt es zu beachten, dass bei einer höheren Restfeuchte > 20 % die Siebfähigkeit der zu behandelnden Stoffströme stark abnimmt.

Grundsätzlich lässt sich neben den verschiedenen NE-Konzentraten auch ein hüttenfähiges Fe-Konzentrat gewinnen, welches allerdings im Hinblick auf Menge, ökonomischen Wert und ökologischen Effekten von untergeordneter Bedeutung ist.

Analog zu den Untersuchungen der konventionellen Metallrückgewinnung werden exemplarisch die Ergebnisse der Aufbereitung der feinkörnigen Fraktionen der Verbrennungsrückstände aus der thermischen Behandlung von „Frischmüll“ und Deponat in einem Verhältnis von 10:1 sowie eines in einer Mechanisch-Biologischen Aufbereitungsanlage (MBA) hergestellten Ersatzbrennstoffes ohne Rückgewinnung eines Fe-Konzentrates beschrieben.

**Tabelle 5-6:** Ergebnisse der Metallrückgewinnung mit dem RENE-Verfahren

MVA-Rostaschen Bezeichnung	deponiestämmiger EBS	Frischmüll: Deponat (10:1)
<b>Massenausbringen in %</b>		
<b>NE-Konzentrat</b>	2,07	3,02
<b>Rückstand</b>	97,93	96,98

Aus Tabelle 5-6 ist zu erkennen, dass aus den feinkörnigen Bestandteilen der untersuchten Stoffströme erhebliche Mengen an NE-Konzentraten zurückgewonnen werden

konnten. Die erzeugten NE-Konzentrate weisen gemittelt über alle Konzentrate einen Gehalt von ca. 28 % Kupfer und 35 % Aluminium auf. Das Wertstoffausbringen für den wichtigsten Wertträger Kupfer liegt bei ca. 85 %. Durch zusätzliche Trennschritte lassen sich aus den NE-Mischkonzentraten hochangereicherte Kupfer- und Aluminium-Konzentrate gewinnen.

Die entstehenden Rückstände sind Schwermetall-abgereichert und können je nach gewählter Aufbereitungstiefe einer mineralischen Verwertung z. B. als Deponieersatzbaustoff oder zur Baustoffherstellung zugeführt werden.

## **5.4. Verwertung der abgetrennten Kunststofffraktionen**

### **5.4.1. Werkstofflich verwertbare Kunststoffe**

Die Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben TönsLM zur produktorientierten Stoffstromtrennung von Leichtgut ballistischer Separatoren mit dem Ziel, werkstofflich verwertbare Kunststofffraktionen zu erzeugen, beruhen auf Großversuchen in einer LVP-Sortieranlage nach BAT-Standard<sup>22</sup>. Dieser Standard ist durch eine mehrstufige Sortierung von Polymeren und Metallen gekennzeichnet, die ein maximiertes Wertstoffausbringen unter Einhaltung der DKR<sup>23</sup>-Anforderungen an die Mindestqualität von Sortierprodukten zulässt. Die Sortierung von aus Deponat gewonnenem „Leichtgut“ erfolgte ohne Veränderung der Grundparametrierung, jedoch mit Beaufschlagung von nur 50 % der üblichen Stundenkapazität. Unter diesen Umständen waren bestmögliche Sortierergebnisse zu erwarten. Die Ergebnisse der Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die im Deponat gebundene Feuchte erschwert die Abtrennung von Feinanteilen durch Siebung erheblich, so dass die Oberflächen von Kunststoffen im Vergleich mit Kunststoffabfällen aus aktueller Erfassung bzw. Sortierung wesentlich stärkere Verschmutzungen aufweisen.
- Im Vergleich mit getrennt gesammelten, kunststoffreichen Leichtstoffen oder aus „frischem“ Hausmüll angereicherten Kunststoffgemischen zeigen Kunststoffe im Deponat einen signifikant höheren Verschmutzungsgrad auf den Oberflächen auf. Analytisch wurden bis zu 7,5 % auf dreidimensionalen Kunststoffen und bis zu 25 % (vgl. Abbildung 5-7) auf flächigen Kunststoffen ermittelt.

---

<sup>22</sup> Beste verfügbare Technik – best available technique

<sup>23</sup> Deutsche Gesellschaft für Kreislaufwirtschaft und Rohstoffe mbH



**Abbildung 5-7:** 3D-Kunststoffe aus rückgebautem Deponiematerial<sup>24</sup>

- Folienkunststoffe sind von der Verschmutzung stärker betroffen als Hartkunststoffe. Sie weisen zudem eine nicht mehr durch Waschprozesse entfernbare bräunliche Verfärbung auf (vgl. Abbildung 5-8).



**Abbildung 5-8:** Abgetrennte Folien aus rückgebautem Deponiematerial

- Die Qualität der Kunststoffe ist weiterhin aufgrund der langjährigen Kontamination im biologisch aktiven Milieu gemindert, was sich in einer Geruchsbelastung sowie verminderter Elastizität niederschlägt, nicht jedoch in verminderter Wertstoffqualität.
- Die Ergebnisse der Sortierungen zeigen, dass sich keine qualitativ definierten Polymermengen entsprechend den DKR-Anforderungen extrahieren lassen. Vielmehr sind zusätzliche Aufbereitungsschritte zur weiteren Reinigung erforderlich. Beispiele

<sup>24</sup> oberflächige Verschmutzung hat einen Anteil von bis zu 7,5 M.-%

für die erzielbare Qualität im Vergleich mit den Mindestanforderungen der Verwertungsbranche finden sich in der folgenden Tabelle.

**Tabelle 5-7:** Erzielbare Qualitäten und DKR-Anforderungen (Auszug)

	PP	PE	Folien
<u>Reinheit</u>			
Erzielte Reinheit (TönsLM Durchschnitt)	89 %	91 %	87 %
DKR-Anforderung	> 94 %	> 94 %	> 92 %
Input LVP-Sortierung (%) (TönsLM Durchschnitt)	6 %	4 %	17 %
<u>Stückgrößen</u>			
Stückgrößen (TönsLM Durchschnitt)	Kein Kriterium		40 M.-% > 200 mm
DKR-Anforderung	Kein Kriterium		> DIN A4
<u>Masse- und Wertstoffausbringen<sup>25</sup></u>			
Masseausbringen $R_M$ (TönsLM Durchschnitt)	0,8 %	0,8 %	1,4 %
Wertstoffausbringen $R_W$ (TönsLM Durchschnitt)	12,4 %	18,4 %	7,1 %

- Der überwiegende Mengenanteil einer produktorientierten Stoffstromtrennung zur Gewinnung stofflich verwertbarer Kunststoffe fällt als Sortierrest an, der sich nur für einen Einsatz als Ersatzbrennstoff eignet. In den Praxistests wurde ein Kunststoffausbringen aus dem Leichtgut der ersten Voranreicherung in Polymerprodukte in der Größenordnung von 13 - 64 % erreicht. Aufgrund der vorne benannten Notwendigkeit, weitere Reinigungsprozesse einzusetzen, müssen allerdings zusätzliche Ausbringungsverluste kalkuliert werden.
- Werden die Prozesse der Vorkonditionierung und Voranreicherung unter optimierten betrieblichen Bedingungen mit hohen Trennwirkungsgraden geführt, ist eine auf ca. 20 - 30 % verbesserte Wertstoffausbringung zu erwarten.
- Aufgrund der limitierten Ausbeute an werkstofflich verwertbaren Kunststoffen wird der wesentliche Massenanteil als Sortierrest anfallen, der sich nur für eine energetische Nutzung eignet.

#### 5.4.2. Stoffliche Verwertung beim Kunststoffaufbereiter

Die weitere Behandlung der weitgehend von Störstoffen befreiten Kunststoffarten (s. Abschnitt 5.4.1) gehört im Bereich der Verpackungen zum Stand der Technik. Für deponiestämmige Kunststofffraktionen ist mit einem erhöhten Eintrag von oberflächigen

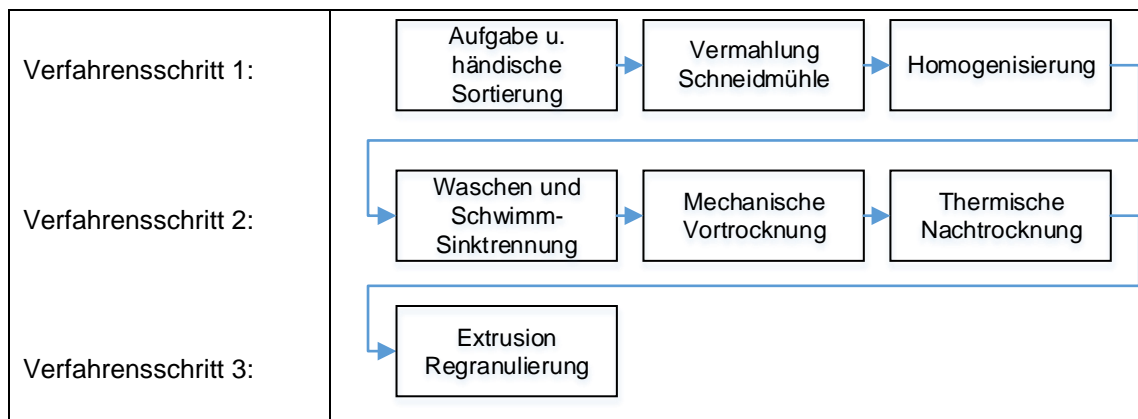
<sup>25</sup> Das Masse- und Wertstoffausbringen bezieht sich auf die Stoffstromtrennung von Leichtgut aus Depo-  
nat, wie sie in einer LVP-Sortieranlage durchgeführt werden kann.

Verschmutzungen (bis zu 7,5 % bei 3D-Kunststoffen, bis zu 25 % bei Folien) zu rechnen. Auch ist die Reinheit der erzeugten Kunststofffraktionen meist unterhalb der durch den DKR vorgegebenen Mindestqualitäten.

Die Abscheidung der noch vorhandenen Verunreinigungen ist im nassen Milieu notwendig (Zimniak 2004). Dabei kommen Waschwannen oder auch zusätzliche Schwimm-Sink-Stufen (Dichtesortierung unter Schwerkrafteinfluss, im Zentrifugalfeld oder in Fluidströmungen) zum Einsatz, um mineralische und organische Fraktionen abzutrennen.

### Verfahrensbeschreibung

In Abbildung 5-9 sind mögliche Veredelungsschritte beim Kunststoffaufbereiter dargestellt. In einem Verfahrensschritt 1 wird händisch der Kunststoff von noch anhaftenden Störstoffen befreit, vermahlen und homogenisiert, in einem Verfahrensschritt 2 wird dann gewaschen, getrennt und getrocknet sowie in einem Verfahrensschritt 3 regranuliert.



**Abbildung 5-9:** Verfahrensfliessbild Aufbereitung von Kunststoffarten

### Spezifische Anforderungen

Die spezifischen Anforderungen ergeben sich aus der Analyse der Verfahrensschritte 1-3, die für PP, PE und PS-Kunststoffe vorgenommen wurden.

Die Versuche zeigten einen verfahrensbedingten Mengenverlust der Kunststoffarten in den Verfahrensschritten 1 und 2. Die weiteren geringen Ausbeuten des Gesamtverfahrens sind bedingt durch die anhaftenden Störstoffe und die z. T. geringe Qualität des Inputmaterials. Die erzielten Ausbeuten sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

**Tabelle 5-8:** Kunststoffausbeute nach der weitergehenden Kunststoffaufbereitung

Polymerart	Ausbeute (bezogen auf Input in Kunststoffaufbereitung)
PS	45 %
PE	75 %
PP	45 %

Folgende Erkenntnisse und Erfahrungen wurden dabei gewonnen:

- Der Durchsatz (< 0,3 t/h) der Vermahlung wurde durch eine zusätzlich erforderliche Handsortierung bestimmt,
- mineralische Anhaftungen erschweren eine Vermahlung und führen zu einer verschlechterten Massenbilanz und erhöhten Staubbelastung,
- die mineralischen Anhaftungen führen zu einem stark erhöhten Verschleiß an den Messern in den Zerkleinerungsschritten und
- es trat Geruchsbildung bei der Extrusion auf.

#### Materialeigenschaften und Einsatzmöglichkeiten:

Mit einer Überprüfung der werkstofflichen Eigenschaften von Kunststoffgranulaten (PP, PE und PS) wurde nachgewiesen, dass die physikalisch-mechanischen Eigenschaften aller drei Einzelfraktionen vergleichbar mit Werten von Recyclaten aus dem Bereich Post Consumer Waste sind. Die Fließeigenschaften für die PP-Fraktion lag mit einem MFR<sup>26</sup> von 9,4 g/10 min im Zwischenbereich von Extrusions- und Spritzgussware, was auch für die PS-Fraktion (MFR von 6,0 g/10 min) zutraf. Die Fraktion PE konnte vorrangig Extrusionstypen zugeordnet werden (MFR von 0,3 g/10 min). Die Belastung an Schadstoffen lag bei allen Proben unterhalb zulässiger Grenzwerte. Aus der Sicht der Kunststoffaufbereiter war allerdings der Halogenwert in der PP-Probe grenzwertig.

Mittels Zugabe von Additiven wie Peroxid kann der MFR entsprechend produktspezifisch erhöht werden.

Für die Planung und Umsetzung der Kunststoffaufbereitung bei einem Verwerter ist zu beachten:

- eine manuelle Nachsortierung der Kunststofffraktionen ist ggf. im Vorfeld der Verwertung vorzusehen,
- die Verwendung einer Nassvermahlung (Waschmühle) oder eine Vermahlung mit nachgeschalteter Friktionswäsche scheint notwendig,
- der Extruder sollte über eine Dreifachentgasung verfügen sowie
- ein zusätzlicher Einsatz von Geruchsabsorbentien ist zu prüfen.

Mögliche Einsatzbereiche von Kunststoffarten aus dem Deponierückbau sind in Tabelle 5-9 dargestellt.

---

<sup>26</sup> Melt Flow Rate, Schmelzflussindex



**Tabelle 5-9:** Mögliche Einsatzbereiche von Kunststoffarten aus dem Deponierückbau

Kunststoffart	Verfahren	Einsatzbereich
PE	Extrusion	Artikel für den Garten- & Landschaftsbau Artikel für den Hoch- & Tiefbau
PP	Extrusion / Spritzguss	Artikel für die Abwassertechnik Artikel für den Garten- & Landschaftsbau Artikel für den Hoch- & Tiefbau Behältersysteme
PS	Extrusion / Spritzguss	Artikel für den Garten- & Landschaftsbau Behältersysteme Gehäuse

### Ergebnisse und Empfehlungen

Aus rein technischer Sicht können für Kunststoffanwendungen nutzbare Regranulate aus Deponaten produziert werden.

Mit den festgestellten Eigenschaften erscheint der Einsatz der Regranulate in Extrusions- resp. Spritzgußanwendungen möglich. Die Verwendung der Regranulate ist nur in Einsatzbereichen mit geringen Ansprüchen an die Oberflächenreinheit zu empfehlen.

Der Abschluss einer Liefervereinbarung ist Grundlage für die stoffliche Verwertung der Kunststoffe, d. h. letztlich muss eine genügend große Menge an einheitlichen Materialien aus der Sortierung zur Verfügung stehen, damit ein Kunststoffaufbereiter im großtechnischen Maßstab mit entsprechendem Durchsatz kostengünstig ein Recyclat für eine Anwendung aus Deponaten produzieren kann.

Für ein Regranulat können üblicherweise 40 bis max. 60 % des Neeware-Niveaus erlöst werden. Das ist auch für Regranulate aus dem Deponierückbau denkbar.

Dem erzielten Erlös aus Regranulaten stehen beim Kunststoffaufbereiter die Betriebskosten für notwendige Zerkleinerungs- und Reinigungsschritte bis hin zur Regranulierung inkl. Schmelzfiltration sowie die zu entsorgenden Abfälle gegenüber.

Deshalb ist hier die Ausbeute eine wichtige Größe bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit.

Die Entscheidung darüber, ob Kunststoffe aus Deponien recyclingfähig sind oder nicht, wird im Wesentlichen durch die Wirtschaftlichkeit des Sortier- und Aufbereitungsprozesses bestimmt (Kapitel 8). Unter den aktuellen Rahmenbedingungen ist ein Recycling der Kunststoffe nicht sinnvoll.

## 6. Behandlung der Feinfraktion < 60 mm

*Sebastian Wanka, Kai Münnich, Klaus Fricke, Boris Breitenstein, Daniel Goldmann, Karsten Füllung, Norbert Dichtl*

Das Kapitel 6 beschäftigt sich mit der Aufbereitung der Feinfraktion, die in Bezug auf die Masse den größten Anteil des Deponats ausmacht. Die Feinfraktion wurde in der Vergangenheit ohne weitere Aufbereitung i.d.R. wieder deponiert. Diese Fraktion enthält neben einem hohen Anteil an Mineralik auch Stoffe mit hohem Heizwert, die nach einer Aufbereitung energetisch verwertet werden können.

Zunächst werden in Abschnitt 6.1 die erforderlichen stofflichen Eigenschaften beschrieben, um Verfahren zur nass-mechanischen Behandlung erfolgreich einzusetzen. Der Abschnitt 6.2 befasst sich mit der ggf. notwendigen biologischen Vorbehandlung der Feinfraktion. Im Abschnitt 6.3 werden in Abhängigkeit von Teilfraktionen des Feinmaterials verschiedene nass-mechanische Verfahren, die im Bereich des Baustoffrecyclings oder der Erzaufbereitung dem Stand der Technik entsprechen, sowie die erzeugten Stoffströme dargestellt. Die Verfahren implizieren den Einsatz von Wasser, welches sich während der Behandlung mit Schad- und Störstoffen anreichert und daher gereinigt werden muss.

### 6.1. Voruntersuchungen am Ausgangsmaterial

Der Massenanteil der Feinfraktion ist über eine Bestimmung der Korngrößenverteilung des gesamten zu untersuchenden Materials zu bestimmen (Kapitel 4). Aus der absoluten Menge der Feinfraktion ergibt sich die Relevanz einer weiteren Behandlung der Feinfraktion für das Gesamtprojekt. Diese wird im Allgemeinen als sehr hoch eingeschätzt, da die Feinfraktion in der Regel den größten Massenanteil an aus Deponien ausgebauten Abfällen aufweist (van Vossen, Prent 2011, vgl. auch Abbildung 2-3).

Die detaillierte Untersuchung des Ausgangsmaterials ist dringend erforderlich, da über die Kenntnis der spezifischen Materialcharakteristika Entscheidungen zum weiteren Vorgehen getroffen werden können. Dabei sollte in jedem Fall die biologische Aktivität des Deponats bestimmt werden. In Bezug auf die Wertstoffrückgewinnung wird eine Differenzierung der Feinfraktion < 60 mm in unterschiedliche Kornklassen empfohlen, um kornklassenspezifisch entscheiden zu können, welche Aufbereitungs- oder Behandlungsverfahren eingesetzt werden können und sollen. Nur durch diese dezidierte Betrachtung der Materialströme ist es möglich, ein maximales Wertstoffausbringen zu erreichen.

Abhängig von den Eigenschaften der Feinfraktion ist eine biologische Behandlung zur Trocknung bzw. Stabilisierung des Stoffstromes oder eine nass-mechanische Behandlung zur Generierung verwertbarer Stoffströme möglich. Denkbar ist auch eine nass-mechanische Aufbereitung nach einer biologischen Stabilisierung. Die nass-mechanische Aufbereitung einer biologisch aktiven Fraktion wird jedoch nicht empfohlen, da dadurch der potentielle Gasertrag reduziert werden würde.

Gerade in der Feinfraktion können häufig erhöhte Gehalte an organischen Schadstoffen (z. B. CKW-haltige Lösemittel, PCB) bestimmt werden. Bei Verdacht erhöhter Schadstoffgehalte dürfen diese Materialien nicht mit unbelasteten Materialien vermischt werden, sondern sie müssen getrennt zwischengelagert und einer getrennten

Behandlung in geeigneten Anlagen zur Sonderabfallbehandlung zu geführt werden. Diese Behandlungsschritte werden hier nicht betrachtet.

### **Vorgehen zur Bestimmung der Eigenschaften des Ausgangsmaterials**

In einem ersten Schritt muss eine Zusammenfassung der Ergebnisse der historischen Erkundung geschehen, um mit einer ersten Abschätzung zu der zu erwartenden stofflichen Zusammensetzung eine bessere Planung für das weitere Vorgehen durchführen zu können. In einem zweiten Schritt muss eine Materialbeschaffung durch Probebohrungen oder Schürfe (s. Abschnitt 2.2) mit angeschlossener Siebklassierung mit einem Sieb der Maschenweite, durch die die Feinfraktion bestimmt wird (hier 60 mm), erfolgen, um im dritten Schritt eine Bewertung der Eigenschaften des Materials durchführen zu können.

### **Bewertung der Makro-Eigenschaften des Materials**

Das aus dem Deponiekörper ausgebaute Material ist einer optischen Sichtung zu unterziehen. Dabei sollte das Material in Hinblick auf die allgemeine Beschaffenheit analysiert werden. Insbesondere sollten der Verschmutzungsgrad, die Geruchsfreisetzung, Verfärbungen sowie Materialform und -stückigkeit aufgenommen und bewertet werden.

Auf Basis dieser ersten Bestimmung der Eigenschaften des Materials können Entscheidungen über weitere Untersuchungen zur Bestimmung der Aufbereitungsfähigkeit gefällt werden.

Im Rahmen dieser Planung des weiteren Untersuchungsrahmens sollten nicht belastete Materialien (z. B. Bodenschichten) oder Materialien, für die Einschränkungen für weitere Behandlungsverfahren vorliegen, wie z. B. Sonderabfälle, direkt separiert werden. Während unbelasteter Boden unmittelbar ohne weitere Aufbereitung wieder als Wertstoff eingesetzt werden kann, werden die Materialien, bei denen Einschränkungen bestehen, für eine Wertstoffrückgewinnung nicht weiter betrachtet. Vorgehen und durchzuführende Analytik zur Bestimmung geeigneter Aufbereitungsverfahren:

- Grobe Bestimmung der Korngrößenverteilung mittels Sieben (> 25 mm / > 10 mm / > 2 mm / < 2 mm).
- Weitere Untersuchungen der einzelnen durch Siebung erhaltenen Fraktionen:
  - Bestimmung von Parametern zur Bewertung der Verwertungsmöglichkeiten nach z. B. DepV Anhang 3 und LAGA M 20 in den erzeugten Fraktionen,
  - Bestimmung der biologischen Aktivität,
  - Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung mittels Sortieranalysen nach den Hauptbestandteilen: Metalle, potentiell heizwertreiche Fraktionen, mineralische Bestandteile und Rest.

Zur Bestimmung der Wertmetallfrachten in den einzelnen Fraktionen sollte ein zweistufiges Vorgehen gewählt werden. In der ersten Stufe ist der Anteil der magnetisierbaren Eisenbestandteile und in der zweiten Stufe der separierbaren NE-Metallbestandteile, in der Regel Aluminium und Kupfer, zu bestimmen.

- Bestimmung des Massenanteils der magnetisierbaren Eisenbestandteile:

Zur Bestimmung der magnetisierbaren Eisenbestandteile in den Kornklassen > 10 mm sollte ein Überbandmagnet eingesetzt werden. Dieser Schritt ist weiterhin zwingend, da ggf. eine Ausschleusung der magnetisierbaren Bestandteile

für angeschlossene Verfahren notwendig ist. Ähnlich zur Bestimmung der magnetisierbaren Eisenbestandteile in den Kornklassen > 10 mm sollte für eben diese Bestimmung in den Kornklassen < 10 mm ein trocken betriebener Trommelmagnet eingesetzt werden. Analog zu den Kornklassen > 10 mm ist dieser Schritt zwingend, da ggf. eine Ausschleusung der magnetisierbaren Bestandteile für angeschlossene Verfahren notwendig ist.

- Bestimmung des Massenanteils der mittelkörnigen, kompakten und weitgehend aufgeschlossenen NE-Bestandteile:

Zur Bestimmung des Wertstoffrückgewinnungspotenzials der Fraktionen > 2 mm sollte ein Wirbelstromscheider genutzt werden.

- Bewertung des Wertstoffrückgewinnungspotenzials:

Zur Bewertung des Wertstoffrückgewinnungspotenzials sollten die separierten metallischen Bestandteile auf ihren Aufschlussgrad hin überprüft werden. Dabei sollte in zwei Kategorien unterschieden werden:

Kategorie 1: die Metalle liegen in ausreichend aufgeschlossener Form als Metalle oder Legierungen sowie in ausreichender Konzentration und Menge vor, so dass eine direkte metallurgische Weiterverarbeitung angestrebt werden kann,

Kategorie 2: die Metalle liegen in einem Verbund mit übrigen Materialien, mit starken Verschmutzungen und/oder geringer Konzentration und Menge vor und müssen folglich einer separaten weiteren Aufbereitung zugeführt werden.

Können im Rahmen der Separation der magnetisierbaren und der NE- Bestandteile relevante Metallfrachten mit vermarktungsfähigen Qualitäten separiert werden, sollte angeschlossen eine spezifiziertere Bestimmung des Wertstoffrückgewinnungspotenzials durchgeführt werden.

Zur weiteren Überprüfung des Wertstoffrückgewinnungspotenzials wird für die Fraktionen < 10 mm eine dezidierte Bestimmung der Korngrößenverteilung mit den Kornklassen > 6,3 mm, > 4 mm, > 2 mm, > 1 mm, > 0,63 mm, > 0,315 mm und < 0,315 mm sowie angeschlossener Gehaltsanalyse auf relevante Elemente empfohlen. Im Rahmen der Gehaltsanalyse sollten Fe, Cu, Al, Zn, Pb, Ni, Cr bestimmt werden. Die Bestimmung weiterer Elemente sollte im Einzelfall geprüft und durchgeführt werden. Zur Auswertung der Ergebnisse sollten die Massenausbringungen der Fraktionen, die Siebdurchgangssummen- und Siebrückstandskurven sowie die Wertmetallausbringungen in den einzelnen Fraktionen berechnet und bewertet werden.

In einem kornklassenabhängigen Vergleich mit den Abbauwürdigkeiten der genannten Metalle einerseits sowie dem Schadstoffpotenzial andererseits muss dann im Einzelfall geprüft werden, ob weitere Maßnahmen zur Wertmetallrückgewinnung und/oder ggfs. Schadstoffentfrachtung unternommen werden sollen.

**Tabelle 6-1:** Abbauwürdigkeit unterschiedlicher Metalle (BGR 2012)

Metall	Abbauwürdigkeit Erz
	mg/kg
Aluminium	k. A.
Blei	40.000 - 60.000
Chrom	35.000 - 60.000
Eisen	350.000 - 450.000
Kupfer	4.000 - 6.000
Nickel	4.000 - 6.000
Zink	ca. 50.000

Für Aluminium werden an dieser Stelle keine Angaben gemacht, da die Aluminiumkonzentration in klassischen Erzen, z. B. Bauxit, nicht mit der Aluminiumkonzentration in Rückständen verglichen werden kann und da das Aluminium in diesen in der Regel als metallisches Aluminium vorliegt. Diese Abbauwürdigkeitsgrenzen sind nur als obere Richtwerte zu verstehen, da ein ELFM immer aus einer Kombination von verschiedenen Zielen angegangen werden wird.

## 6.2. Biologische Behandlung der Feinfraktion

Eine Bewertung der biologischen Aktivität des Feinmaterials kann auf die Fraktion < 10 mm reduziert werden, da sich organische Materialien, die für einen biologischen Abbau verfügbar sind, aufgrund von Alterungs- bzw. Zersetzungsprozessen überwiegend in dieser Fraktion konzentrieren. Eine Bewertung der biologischen Aktivität des Materials kann anhand ausgewählter Prüfkriterien, welche deponiespezifische als auch materialspezifische Kennwerte beinhalten, erfolgen. Die materialspezifischen Werte entsprechen dabei den Parametern Glühverlust, TOC, Atmungsaktivität, Gasbildungsrate und DOC, welche als Leitparameter verwendet werden können und ggf. in Kombination der Kriterien nach DepV Tabelle 2 Rückschlüsse bezüglich der Wiederablagerung des Materials zulassen.

Untersuchungen haben gezeigt (DWA 2012, eigene Ergebnisse Leichtweiß-Institut), dass Deponat häufig insgesamt nur eine geringe biologische Aktivität aufweist. Eine Nutzung anaerober Verfahren zur Erzeugung von Biogas aus diesem Deponat ist damit nicht wirtschaftlich. Aus Gründen der Vollständigkeit soll dennoch auf diese Verfahren verwiesen werden. In jedem Fall ist eine Einzelfallprüfung der Parameter an mehreren Proben des zu untersuchenden Deponats notwendig.

**Tabelle 6-2:** Prüfkriterien für eine aerobe Nachbehandlung (geändert und ergänzt nach DWA 2002)

Kriterium	Art bzw. Wert	Bewertung
Abfallart	Siedlungsabfälle	• +
	Bodenaushub, Baurestmassen	–
Alter von Siedlungsabfällen	< 10 Jahre	+
	> 30 Jahre	–
Deponiegasproduktion	> 8 m <sup>3</sup> /Mg*a	+
	< 8 m <sup>3</sup> /Mg*a	–
Materialstruktur	vorwiegend Kleinfraktion (< 8 mm)	–
	strukturreich	–
Glühverlust	< 15 M.-%	–
	> 25 M.-%	• +
TOC	< 18 M.-% (Max. zul. Wert gemäß DepV)	-
DOC	< 300 mg/l (Max. zul. Wert gemäß DepV)	-
Atmungsaktivität	< 5 mg O <sub>2</sub> /g TS (Max. zul. Wert gemäß DepV)	-
Gasbildungsrate	< 20 NI/kg TS (Max. zul. Wert gemäß DepV)	-
Selbsterhitzung	> 30 °C	+
	< 30 °C	–
Stoffgruppen (nach van Soest)	vorwiegend leicht und mittellöslich	+
	Vorwiegend schwer und nichtlöslich	–

- schlechte Eignung für eine aerobe Behandlung

• mäßige Eignung für eine aerobe Behandlung

+ gute Eignung für eine aerobe Behandlung

Wird das Material nach Prüfung der Kriterien gemäß Tabelle 6-2 als geeignet für eine biologische Behandlung gewertet, werden vor der praktischen Umsetzung Versuche im Labor- bzw. halbtechnischen Maßstab empfohlen, um die gewonnenen Erkenntnisse abzusichern.

Eine biologische Behandlung der Feinfraktion wird nur dann erfolgen, wenn die Untersuchungen zum biologischen Abbauverhalten (AT<sub>4</sub> bzw. GB<sub>21</sub>) ein ausreichend hohes Abbaupotenzial organischer Substanzen aufzeigen.

Die biologische Behandlung des rückgebauten Deponats kann dann mit den Standardmethoden zur aeroben bzw. anaeroben Abfallbehandlung erfolgen. Die Verfahrensauswahl richtet sich dabei nach den vorliegenden Materialeigenschaften und dem Ziel der Behandlung.

### Aerobe Behandlung

Die aerobe Behandlung von Abfallstoffen, im Allgemeinen als Rotte bezeichnet, umschreibt den Abbau leicht bis schwer verfügbarer organischer Substanz. Durch die be-

reits erfolgte Ablagerung des Deponats ist davon auszugehen, dass nur noch, in Abhängigkeit des Alters des Deponiekörpers, mittel- bis schwer abbaubare Substanzen im Deponat vorhanden sind. Anforderungen an das Material werden hinsichtlich der Struktur gestellt, um eine Belüftung zu gewährleisten sowie einen optimalen Wassergehalt. Durch die Beschränkung auf die Feinfraktion ist zum einen eine weitere mechanische Aufbereitung (Zerkleinerung) nicht erforderlich, zum anderen kann das Material jedoch bereits so fein sein, dass eine optimale Belüftung des Deponats nicht gewährleistet ist.

Wenn es die Belastung des Feinmaterials mit Schadstoffen zulässt, kann auch eine Vermischung mit Frischabfällen erfolgen, so dass mehr Strukturmaterial im zu behandelnden Material eingebaut wird und sich eine höhere biologische Aktivität einstellen kann. Dies muss im Einzelfall überprüft werden.

Der Anwendungsfall der Komposterzeugung kann bei der Behandlung von Deponat aufgrund möglicher Schadstoffbelastungen als auch rechtlicher Aspekte ausgeschlossen werden.

#### Anaerobe Behandlung

Die anaerobe Behandlung von Abfallstoffen, im Allgemeinen als Vergärung bezeichnet, umschreibt den Abbau vorwiegend leicht verfügbarer organischer Substanz durch Mikroorganismen. Durch die bereits erfolgte Ablagerung auf Deponien und dem erfolgten Abbau der organischen Substanz (abhängig vom Alter des Deponiekörpers) ist davon auszugehen, dass das in der Feinfraktion des Deponats noch vorhandene Gasrestpotenzial nur noch gering ist. Eine Einzelfallprüfung ist auch hier auf jeden Fall erforderlich. Im Gegensatz zu aeroben Verfahren ist für den Prozessablauf, aufgrund fehlender Belüftung, kein Strukturmaterial notwendig, so dass diese Verfahren prinzipiell besser für die Feinfraktion des Deponats geeignet sind. Die Feinfraktion muss keiner weiteren Zerkleinerung zugeführt werden.

Auch hier kann - unter Berücksichtigung des Schadstoffpotenzials der Feinfraktion des Deponats - überlegt werden, ob eine Vermischung mit Frischabfall erfolgen kann, um das noch vorhandene, eventuell niedrige Gaspotenzial zu nutzen. Eine Einzelfallprüfung ist in jedem Fall erforderlich.

### **6.3. Nass-mechanische Aufbereitungsverfahren der Feinfraktion**

Abhängig von den Ergebnissen der Analyse des Deponats nach Abschnitt 6.1 kann eine Aufbereitung der Feinfraktion erfolgen. Ergibt sich ausgehend von der Bestimmung der Ausgangssituation, dass hohe Wassergehalte (> 25 M.-%) und hohe Glühverluste (> 20 M.-%) sowie generell schlechte Sortiereigenschaften, z. B. durch Verbackungen oder Zerfaserung, einen Einsatz trocken-mechanischer Sortiertechnik verhindern, sollten nass-mechanische Sortierverfahren zum Einsatz kommen. Diese Verfahren können die Qualität des behandelten Materials erhöhen, da u. a. auch Anhaftungen an der Oberfläche gelöst und entfernt werden können.

Dabei sollten Verfahren genutzt werden, welche eine Sortierung der unterschiedlichen Materialbestandteile nach Unterschieden in der spezifischen Dichte der Einzelbestandteile erreichen. Im Folgenden werden zwei Verfahren, die mit Wasser als Stütz- und Hilfsmedium arbeiten, zur weiteren Behandlung der Fraktionen 10 – 60 mm und < 10 mm näher erläutert. Durch den Einsatz dieser nass-mechanischen Trennverfahren lassen sich grundsätzlich unterschiedliche Materialien erzeugen:

Schergüter sind Materialien mit höheren spezifischen Dichten. In diesen Schergütern sollten insbesondere mineralische und metallische Bestandteile aus den eingesetzten Aggregaten ausgetragen werden.

Leichtgüter sind Materialien mit geringeren spezifischen Dichten. In diesen Leichtgütern sollten die Materialien ausgetragen werden, welche einen höheren Heizwert besitzen, insbesondere Holz, Kunststoffe, Papier, Textilien o.ä.

Mittelgüter sind Mischfraktionen, die sich aus nicht vollständig separierten Ausgangsmaterialien zusammensetzen und ggf. wiederholt in die Behandlungsstufe eingeschleust werden.

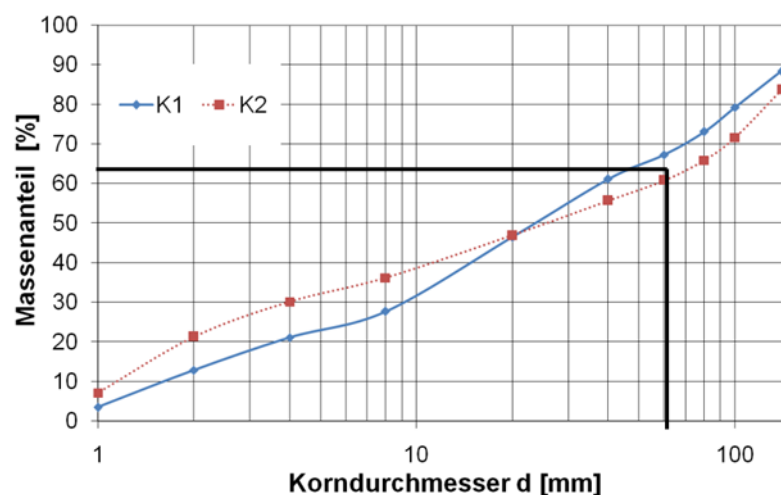
Feingüter bzw. Sandfraktionen

Feinstkörnige Bestandteile (z. B. < 100  $\mu\text{m}$ ) aus der Entwässerung unterschiedlicher erzeugter Fraktion.

### Beispielhafte Ausgangslage zum Einsatz nass-mechanischer Verfahren

Im Folgenden werden die Rahmenbedingungen vorgestellt, welche zur Entwicklung des nass-mechanischen Aufbereitungsprozesses geführt haben. Ausgehend von der Sieblinie des gesamten Deponats sowie der Musterabfallzusammensetzung wurden nach einer vorgeschalteten Siebklassierung die in folgenden Kapiteln beschriebenen Massenbilanzen und Materialeigenschaften ermittelt.

Das Material für die Versuchsdurchführungen zur nass-mechanischen Aufbereitung stammt aus der Haus- und Gewerbeabfalldeponie des Entsorgungszentrums „Pohlische Heide“ im Kreis Minden-Lübbecke. Das Deponat wurde aus zwei verschiedenen Abschnitten entnommen, die sich bezüglich des Zeitpunktes der Abfalleinlagerung unterscheiden. Die Abfälle im Bereich von K1 wurden im Zeitraum 1989 - 1990 und die im Bereich von K2 im Zeitraum 1996 - 2005 abgelagert. In Abbildung 6-1 ist zunächst die Sieblinie und der Anteil der Fraktion < 60 mm des untersuchten Deponates dargestellt. Trotz des verschiedenen Ablagerungszeitraumes und damit auch des Alters der Abfälle ist eine große Ähnlichkeit im Verlauf der Körnungslinien erkennbar. Der Anteil der Feinfraktion liegt bei ca. 65 M.-%.

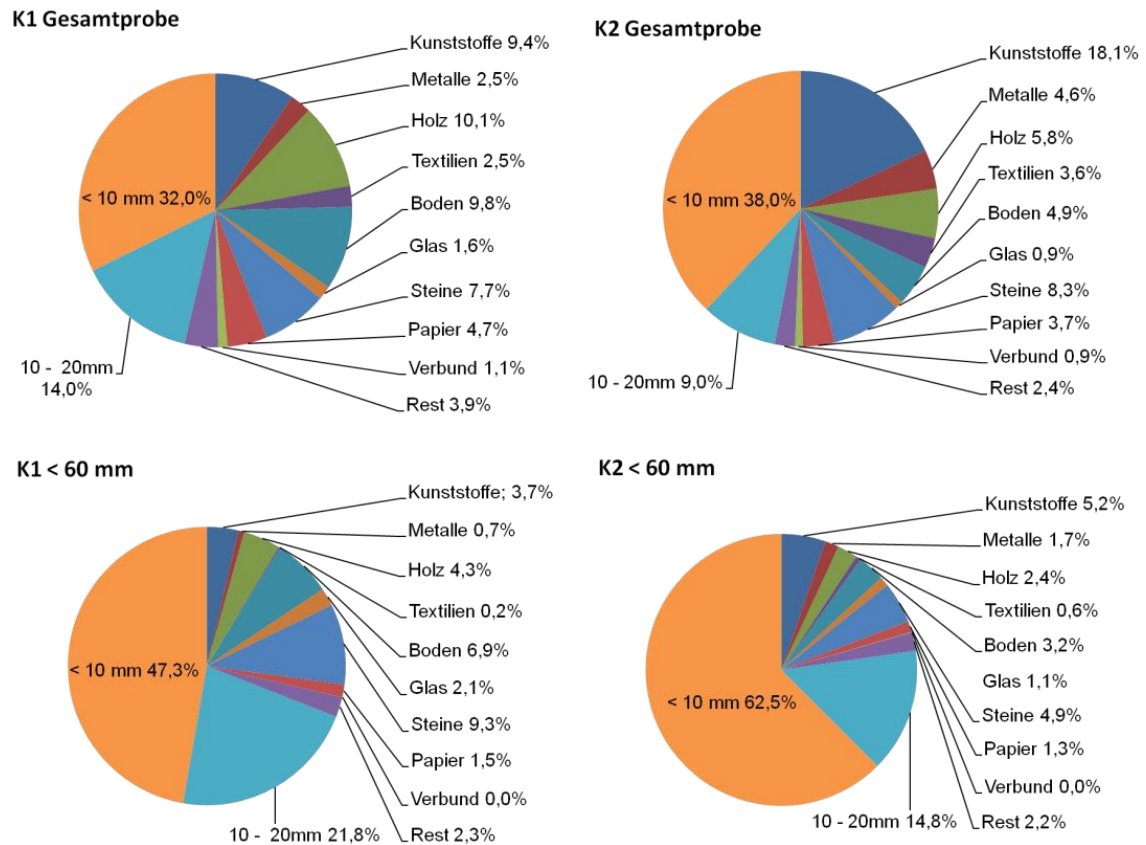


**Abbildung 6-1:** Sieblinien des Deponates

Ergänzend zu der Sieblinie wurde die stoffliche Zusammensetzung der Feinfraktion < 60 mm, differenziert nach Kornfraktionen, über die klassische Methode der Sortier-



analyse ermittelt (Abbildung 6-2) (s. a. Kapitel 3). Der Vergleich der Sortieranalysen zeigt, dass erwartungsgemäß nach dem Absieben auf < 60 mm der Anteil der Feinfraktion < 10 – 20 mm deutlich zunimmt. Es zeigt sich aber auch, dass immer noch ein erheblicher Anteil an Stoffen vorhanden ist, die der heizwertreichen Fraktion zugeordnet werden können. Der einzusetzende Prozess für die Weiteraufbereitung der Fraktion < 60 mm muss daher diese verschiedenen Fraktionen, die unterschiedliche chemisch-physikalische Eigenschaften aufweisen, sicher trennen.



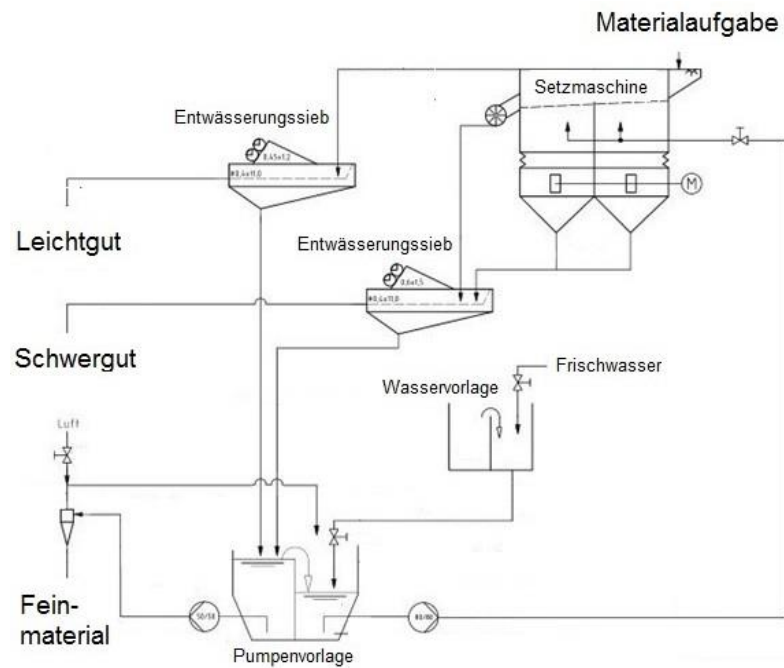
**Abbildung 6-2:** Stoffliche Zusammensetzung des Deponates

### 6.3.1. Behandlung der Fraktion 10 - 60 mm in einer Setzmaschine

Eine auf der unterschiedlichen Stoffdichte basierende Auftrennung des rückgebauten Deponats 10 – 60 mm kann mittels Setztechnik durchgeführt werden. Nasssetzmaschinen werden großtechnisch in der Aufbereitung von Massengütern (z. B. Erz, Bauschutt, Boden) eingesetzt und können daher den Massenströmen optimal angepasst werden. Diese Technik wurde bisher nicht zur Aufbereitung von Deponat eingesetzt, die durchgeführten Versuche zeigen jedoch, dass die erwünschten Aufbereitungsziele damit erreicht werden können.

Andere Verfahren zur Dichtesortierung z. B. auf Basis der Schwimm-Sink-Trennung erscheinen für derartige komplexe Stoffströme, wie sie rückgebauten Abfälle darstellen, wenig geeignet. Tendenziell ergeben sich die im Folgenden genannten Kennwerte, eine Einzelfallprüfung für den rückzubauenden Hausmüll ist immer erforderlich.

Für die Behandlung der ausgebauten Abfälle wurde das in Abbildung 6-3 prinzipiell beschriebene Aufbereitungsverfahren eingesetzt.



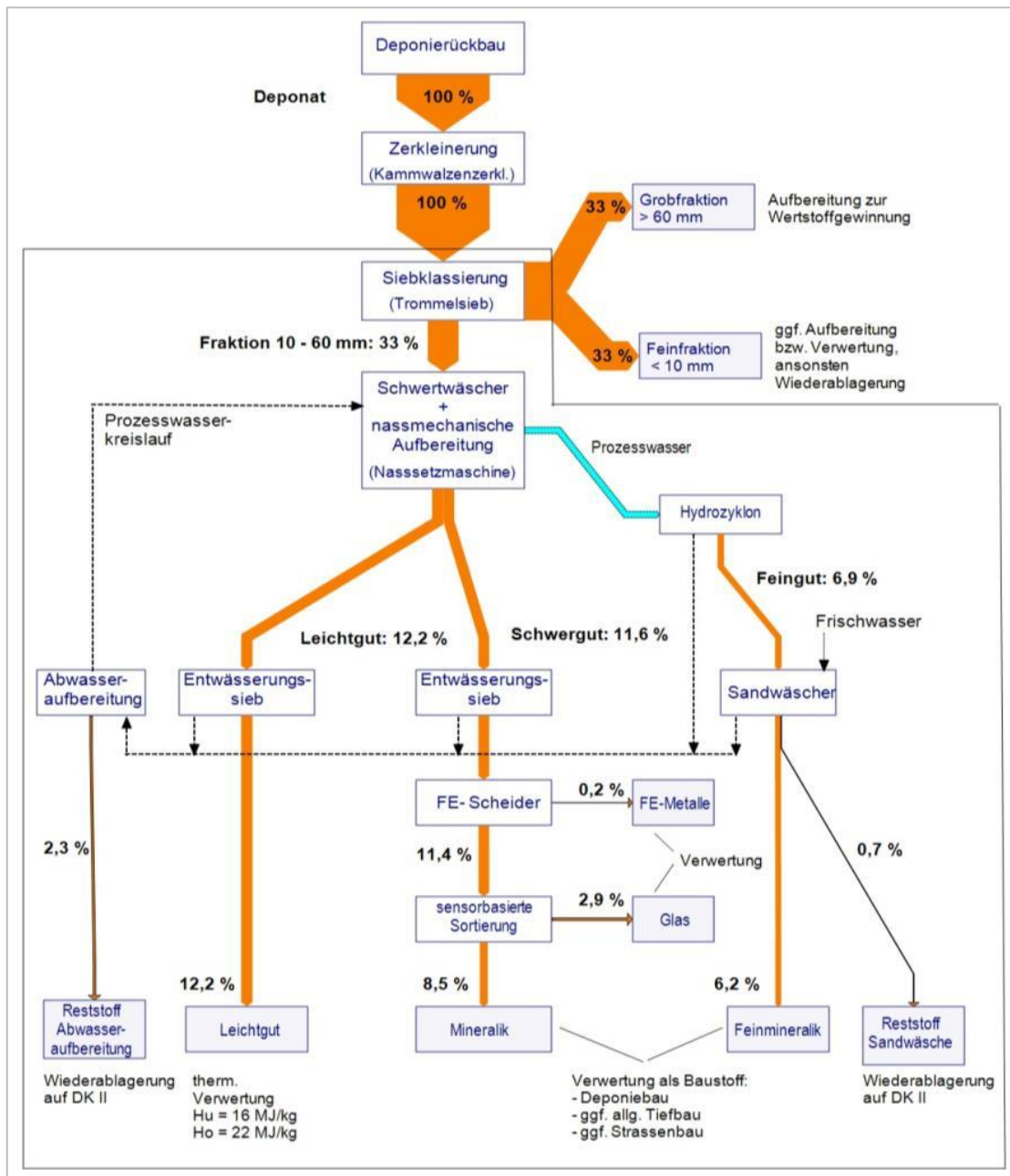
**Abbildung 6-3:** Vereinfachtes Verfahrensfliessbild zur Nass-mechanischen Aufbereitung von Deponat mittels Nassetzmaschine Triple A (AGS Anlagen + Verfahren GmbH)

Auf dem Setzbettträger bildet sich das Setzbett aus, das aus Material mit spezifisch höherer Dichte, dem Schwergut, besteht. Leichtere Bestandteile ordnen sich aufgrund des vertikalen Impulses und der niedrigeren Dichte oberhalb des Setzbettes an und werden anschließend mit dem Waschwasser aus dem Setzfass befördert. Das Schwergut wird über eine Zellenrad-Schleuse aus dem Setzfass ausgetragen. Zusätzlich in den Waschwasserkreislauf integriert ist ein Hydrozyklon. Dieser ermöglicht das Abscheiden feiner, vorwiegend mineralischer Bestandteile aus dem Waschwasser. Das über den Zyklon aufbereitete Waschwasser wird anschließend wieder dem Waschwasserkreislauf zugeführt.

Abtrennbare Wertstoffe bilden die Leichtstoffe, die nach einer Trocknung einer energetischen Verwertung zugeführt werden können. Eine stoffliche Verwertung, z. B. der darin enthaltenen Kunststoffe, wird aufgrund der vielfältigen stofflichen Zusammensetzung, geringen Materialqualitäten und der notwendigen und aufwändigen Sortierung nicht erwartet. Weiterhin kann ein Schwergut- und ein Feingutstrom erzeugt werden, die im Bausektor stofflich verwertet werden können.

Eine Abtrennung der Fraktion < 10 mm vor der Nass-mechanischen Aufbereitung mittels einer Setzmaschine kann erforderlich werden, da die Fraktion < 10 mm während des Setzprozesses in das Leichtgut gefördert wird und sich damit nachteilig auf den Einsatz des Leichtgutes zur energetischen Verwertung auswirkt. Mit dem Abscheiden der Fraktion < 10 mm wird weiterhin der Setzprozess hinsichtlich des Trennvorganges begünstigt sowie das Prozesswasser weniger belastet. Weiterhin wird die Aufbereitung der Fraktion < 10 mm im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

In Abbildung 6-4 sind die Stoffströme, die sich nach einer Behandlung des rückgebauten Abfalls ergeben können, aufgezeigt. Auch hier sind Einzelfalluntersuchungen zur Ermittlung der einzelnen Stoffströme des rückzubauenden Abfalls erforderlich.



**Abbildung 6-4:** Mögliche Stoffströme nach einer nass-mechanischen Aufbereitung

### Produktbewertung der Stoffströme aus der Versuchsdurchführung

Abhängig vom Inventar der betrachteten Deponie setzt sich das Leichtgut aus Anteilen von Kunststoffen in Form von Hartkunststoff bzw. Folien sowie Anteilen von Holz, Textilien, Papier und Verbundmaterial zusammen. Aufgrund der stofflichen Zusammensetzung scheint diese Fraktion für eine thermische Verwertung geeignet. Für den Einsatz des Leichtgutes als Ersatzbrennstoff gibt es keine einheitlichen Grenzwerte. Zur Qualitätsbestimmung und Bewertung der Eignung als Brennstoff wird demnach eine Analyse gemäß gütegesichertem Sekundärbrennstoff nach RAL GZ- 724 empfohlen. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse können Rückschlüsse auf die Verwertungsmöglichkeiten des Leichtgutes gezogen werden. Der Einsatz des Leichtgutes als EBS erscheint realistisch. Mit dem Einhalten der Gütekriterien nach RAL GZ- 724 verliert das Leichtgut seinen Status als Abfall und steht einer höherwertigeren Verwertung als Produkt zur Verfügung. Anhand der Bestimmung der Qualitätsmerkmale können weiterhin

Rückschlüsse gezogen werden in wie weit der Produktstatus durch eine weitere Aufbereitung des Leichtgutes erreicht werden kann. Kritische Parameter können vor allem Chlor, Schwefel, Blei, Cadmium und Kupfer darstellen. Die Eignung der erzeugten Brennstoffe ist nach Abschnitt 5.1 zu prüfen.

Abhängig vom Inventar der betrachteten Deponie setzt sich das Schwergut vorwiegend aus Anteilen von natürlich und industriell hergestellten Gesteinskörnungen, Ziegeln, Klinker, Steinzeug aber auch Glas und Metallen zusammen. Aufgrund der stofflichen Zusammensetzung scheint diese Fraktion für eine direkte Verwertung ungeeignet und Bedarf einer weiteren Aufbereitung. Vorhandene Metalle können mittels Überbandmagneten entfernt und ggf. einer Verwertung zugeführt werden. Eine Abscheidung von Glas kann vor allem dann erforderlich werden, wenn die Qualitätsanforderungen für das Schwergut hinsichtlich bautechnischer Eigenschaften eingehalten werden sollen. Eine Abtrennung zur Erzeugung eines Wirtschaftsgutes ist derzeit eher unwahrscheinlich. Der höherwertigere Einsatz des Schwergutes z. B. als Baustoff im Straßenbau bedingt die Erfüllung umweltrelevanter als auch bautechnischer Anforderungen. Als Mindestanforderungen können dazu die TL- Gestein StB 04, TL-SoB StB 04 und TL BuB E- Stb 09 angesehen werden. Werden die entsprechenden Kriterien eingehalten, kann das Schwergut als Produkt einer stofflichen Nutzung zugeführt werden. Kritische Parameter stellen hierbei vor allem der geforderte geringe Anteil an zulässigen Fremdstoffen dar als auch das Wasseraufnahmevermögen bzw. die Frostempfindlichkeit.

Das Feingut wird bspw. über Hydrozyklone im Rahmen der Prozesswasseraufbereitung gewonnen. Das Material ist feinkörnig und entspricht nach seiner Körnungslinie einem Sand mit Anteilen von Ton und Schluff. Für einen höherwertigeren Einsatz des Feingutes, z. B. als Baustoff im Straßenbau, sind sowohl umweltrelevante als auch bautechnische Anforderungen gemäß dem Schwergut zu erfüllen. Gerade Schluff und Tonanteile können die umweltrelevanten Anforderungen stark beeinflussen. Um eine höherwertige Nutzung des Feingutes als Baustoff zu gewährleisten, wird deshalb eine Sandwäsche empfohlen. Diese Verfahren sind Stand der Technik und werden bspw. auch in der Abwasseraufbereitung erfolgreich eingesetzt. Kritische Parameter stellen wie bei dem Schwergut sowohl die Fremdstoffe als auch das Wasseraufnahmevermögen bzw. die Frostempfindlichkeit dar.

Außer zur Aufbereitung der Abfälle kann die Nasssetzmaschine auch zur Behandlung der kiesigen Entwässerungsschicht der Deponiebasisabdichtung eingesetzt werden, um sie einer Wiederverwertung zuzuführen.

Neben der Bereitstellung von Sekundärrohstoffen hat die Aufbereitung mittels Nasssetzmaschine auch einen entscheidenden Einfluss auf das Volumen der wiederabzulagernden Reststoffe, die zurzeit nicht weiter genutzt werden können. Je nach Zusammensetzung des Deponiekörpers kann durch die Aufbereitung der Grobfraktion > 60 mm das ursprüngliche Deponievolumen um ca. 40 – 45 % reduziert werden. Erfolgt eine Nassaufbereitung mit einer Ablagerung nur der Fraktion < 10 mm, so erscheint eine Volumenreduktion um bis zu 70 – 80 % gegenüber dem Ausgangszustand möglich. Eine weitere Volumenreduktion sowie eine erweiterte Wertstoffrückgewinnung wird durch die Aufbereitung der Feinfraktion < 10 mm ermöglicht.

### **6.3.2. Behandlung der Fraktion < 10 mm mit einem Nasstrenntisch oder Wendelscheider**

Wird eine Abtrennung der nur in sehr geringen Konzentrationen vorliegenden Metalle mit trocken-mechanischer Sortiertechnik aufgrund hoher Wassergehalte (> 25 M.-%),

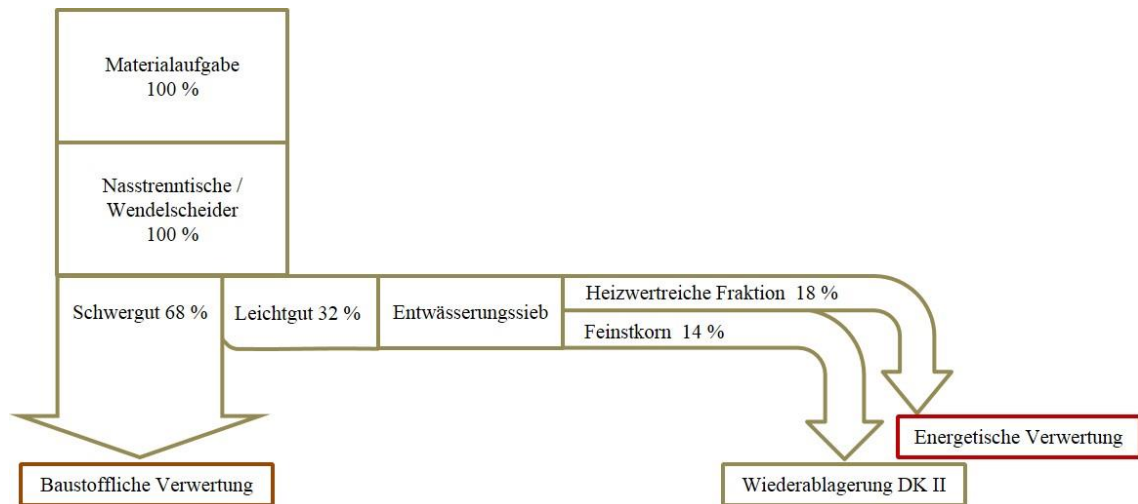
hoher Glühverluste (> 20 M.-%) sowie generell schlechten Sortiereigenschaften, z. B. durch starke Zerfaserung, Bildung von Agglomeraten und einem hohen Verschmutzungsgrad verhindert, sollte eine nass-mechanische Aufbereitung auch für diesen Teilstrom integriert werden. Für die nass-mechanische Aufbereitung der Fraktionen < 10 mm können Nasstrenntische oder Wendelscheider, welche eine Sortierung über Unterschiede in der spezifischen Dichte erreichen und Siebe sowie Filteranlagen und ggfs. Eindicker zur Entwässerung eingesetzt werden. Die Behandlungskapazitäten der Nasstrenntische oder Wendelscheider sowie sämtlicher Peripherieanlagen und Aggregate sind dabei in der Planungsphase an die anfallenden Mengen der Fraktion < 10 mm anzupassen. Dabei entspricht die Aufbereitung von Deponat mittels Nasstrenntischen oder Wendelscheidern nicht dem Stand der Technik. Für den vorgestellten Verfahrensansatz können jedoch frei am Markt verfügbare und upscalebare Aggregate verwendet werden. Über weitere Untersuchungen könnte somit ein neuer Stand der Technik definiert und in Anlagen umgesetzt werden.

Grundvoraussetzung für die Sortierung mittels nass-mechanischer Sortierverfahren ist die Vermischung der zu behandelnden Materialien mit Wasser, welches als Stütz- und Hilfsmedium dient. Dazu sollte das Material nach der vorgeschalteten Klassierung mit einem Sieb der Maschenweite 10 mm in einen an die zu behandelnde Materialmenge angepassten Vorlagebehälter gegeben werden, in welchem das Material durch Rühren mit Wasser vermischt und komplett benetzt werden muss. Es sollte ein Feststoff-Wasserverhältnis von mindestens 1:10 gewählt werden.

Angeschlossen an die Benetzung der zu behandelnden Materialien sollten diese möglichst mittels Schwerkraft auf die Nasstrenntische oder Wendelscheider gefördert werden. Nasstrenntische bieten den Vorteil sehr hoher Trennschärfen und hoher Prozessflexibilität, sind aber auf Grund des Grundflächenbedarfs für sehr große Massenströme selten im Einsatz. Hier wird dann in der Regel auf Wendelscheider zurückgegriffen, die zwar häufig geringere Trennschärfen und Prozessflexibilitäten aufweisen, dafür aber mit sehr viel geringerem Grundflächenbedarf auskommen. Nasstrenntische sind im Bereich der Aufbereitung hochwertiger Abfallströme wie Elektronikschrott im Einsatz, Wendelscheider dagegen im Bereich der Behandlung von Massenströmen etwa im Bereich der Bodensanierung. Da das verfahrenstechnische Grundkonzept auf den gleichen physikalischen Parametern aufbaut, wurden die Untersuchungen im Rahmen dieses Projektes auf Nasstrenntischen durchgeführt. Die Ergebnisse sollten sich aber prinzipiell auf Wendelscheider übertragen lassen.

### Ergebnisse und Empfehlungen

Zur Aufbereitung der im Rahmen des TönsLM-Projektes erzeugten Feinfraktion < 10 mm wurden umfangreiche Untersuchungen im Technikumsmaßstab durchgeführt. Mittels einer Aufbereitung über nass-mechanische Trennprozesse konnte eine weitreichende Wertstoffrückgewinnung erreicht werden. Die prinzipielle Reihenfolge der Aggregate sowie eine realistische Massenbilanz sind in Abbildung 6-5 dargestellt.



**Abbildung 6-5:** Verfahrensfliessbild zur Aufbereitung der Fraktion < 10 mm

Über die Sortierung nach Dichteunterschieden der einzelnen Bestandteile lassen sich im Wesentlichen zwei Wertstofffraktionen erzeugen, ein Schwergut und ein Leichtgut. Das Schwergut sollte in Abhängigkeit von der Abfallzusammensetzung den Großteil der Aufgabemasse ausmachen. Weiterhin ist davon auszugehen, dass aus dem erzeugten Schwergut mittels Überbandmagnet unter günstigen Umständen ein Eisenkonzentrat separiert werden kann, welches direkt vermarktungsfähig sein sollte. Der NE-Metall-Gehalt im verbleibenden Schwergut ist in der Regel so gering, dass ein Einsatz als mineralischer Baustoff außerhalb von Deponien geprüft werden sollte. Zur Bestimmung der Einsatzfähigkeit der generierten Materialien können als Mindestanforderungen dazu die TL- Gestein, TL- StB 04 und TL BuB E- Stb 09 herangezogen werden. Werden die entsprechenden Kriterien eingehalten, kann das Schwergut als Produkt einer stofflichen Nutzung zugeführt werden. Kritische Parameter stellen hierbei vor allem die nur in geringen Anteilen zulässigen Fremdstoffe, das Wasseraufnahmevermögen bzw. die Frostempfindlichkeit sowie die Schadstoffbelastung des Materials dar.

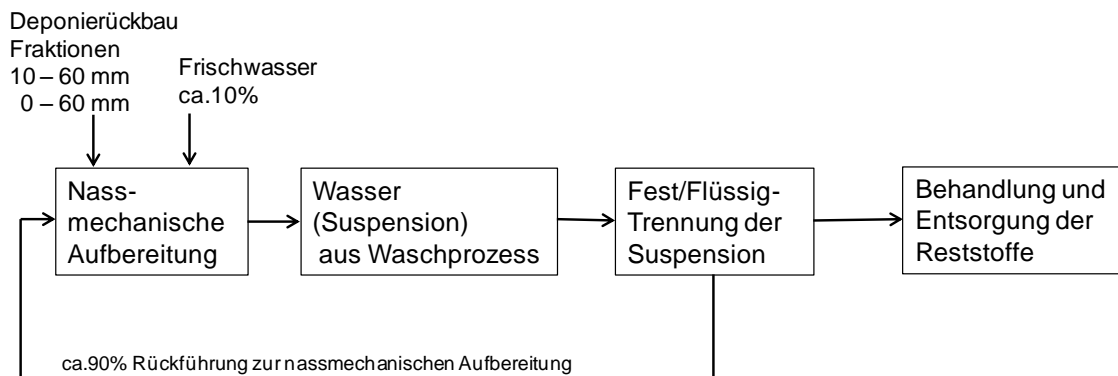
Das bei der Sortierung auf den Nasstrenntischen erzeugte Leichtgut sollte auf ein Sieb geringer Maschenweite (Entwässerungssieb) gefördert werden. Dabei werden auf dem Sieb zwei Effekte erreicht. Erstens wird die Hauptmenge des Materials entwässert und zweitens wird eine Feinstkornfraktion abgetrennt, in der sich mitgeschleppte restliche Mineralikkomponenten finden. Dieses bei der Siebung entstehende Unterkorn verbleibt als Reststoff, welcher einer erneuten Deponierung zugeführt werden muss, da derzeit kein anderer Verwertungsweg bereit steht. Das im Siebüberlauf ausgebrachte klassierte Leichtgut, welches im Rahmen der Untersuchungen Heizwerte im Bereich > 12.000 kJ/kg aufgewiesen hat, kann folglich einer energetischen Verwertung zugeführt werden. Die Behandlungsmöglichkeiten der erzeugten Materialien sind dabei nach Abschnitt 5.1.2 und 5.1.3 zu prüfen.

Alle bisherigen Untersuchungen ergaben, dass das auf Nasstrenntischen oder Wendelscheidern abgetrennte Schwergut arm an Schwermetallen ist, hingegen im heizwertreichen Leichtgut höhere Gehalte anzutreffen sind, die sich auf in der Deponie mobilisierte und an Organikkomponenten wieder abgeschiedene Metalle zurückführen lassen. Eine Separation solcher metallischer Bestandteile kann nach einer energetischen Verwertung über eine von der Korngröße abhängige MVA-Schlackenaufbereitung, welche in Abschnitt 5.3 beschrieben ist, erfolgen.

Sollte die Qualität der erzeugten Schwer- oder Leichtgüter in einstufigen Prozessführungen nicht ausreichend sein, kann eine Verschaltung von Rougher-, Cleaner- und Scavenger-Prozessstufen in Betracht gezogen werden. Grundsätzlich ist zu empfehlen, Dichttrennversuche zunächst auf Nasstrenntischen durchzuführen und bei Erfolg anschließend auf Wendelscheider zu übertragen.

### 6.3.3. Aufbereitung des Prozesswassers zur Kreislaufführung

Durch den Einsatz einer nass-mechanischen Aufbereitung beim Deponierückbau kann einerseits der Anteil der zu deponierenden Feststoffe stark reduziert werden, andererseits entstehen beim Waschprozess Suspensionen, die im Hinblick auf eine Kreislaufführung des eingesetzten Prozesswassers aufbereitet werden. Die Fragestellung ist, inwieweit die so entstehenden Suspensionen von den Feststoffen entfrachtet werden können, um das Prozesswasser zur nass-mechanischen Aufbereitung zurückzuführen. Gleichmaßen muss ermittelt werden, wie weit sich die bei der Entfrachtung ausgeschleusten Feststoffe zur weiteren Behandlung/Entsorgung aufkonzentrieren lassen.

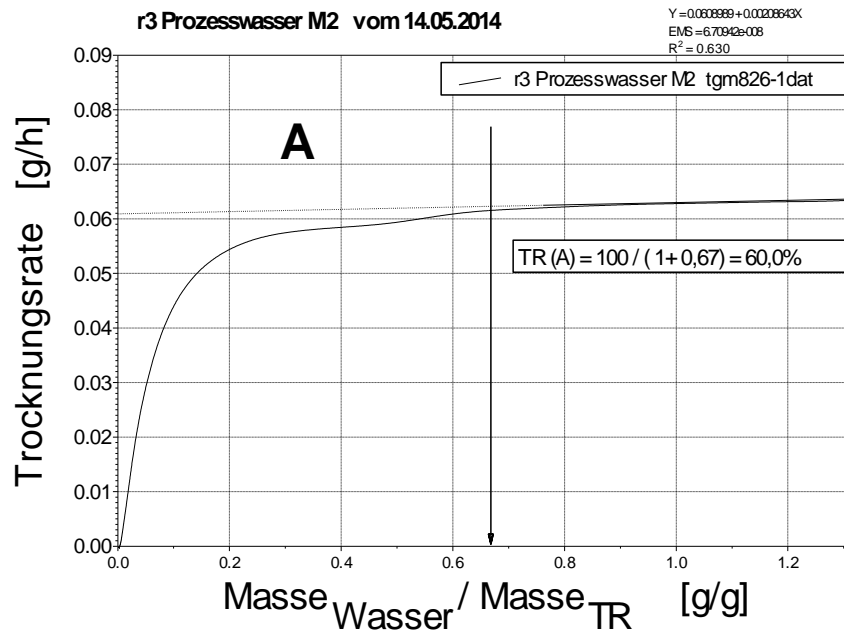


**Abbildung 6-6:** Fließschema zur Entstehung der Suspension und Rückführung des feststofffreien Prozesswassers

Bei diesen nass-mechanischen Aufbereitungen entstehen Suspensionen, die in Abhängigkeit der eingesetzten Verfahrenstechnik einen Feststoffgehalt bis 5 % mit einem Glühverlust von ca. 25 % aufweisen. Die Suspensionen können Sickerwasserbehandlungsanlagen mit Belebtschlammverfahren, wie sie an vielen Deponien vorhanden sind, nicht zugeführt werden, da die üblicherweise verwendeten Verfahrenstechniken für Deponiesickerwasser mit sehr geringen Feststoffgehalten ausgelegt sind. Die im Belebtschlamm suspendierte Biomasse bildet nach Beschickung mit der Suspension keine Flockenstruktur mehr, sondern verwendet Feinstpartikel und Tonminerale als Aufwuchskörper. Diese Partikel sedimentieren stark und können nur in turbulenten Strömungen durch z. B. energieintensive Belüftung in Schwebelage gehalten werden. Durch Sedimentation können sich anaerobe Zonen bilden, in denen ein gezielter weiterer Abbau der Inhaltsstoffe kaum noch möglich wäre. In Belebungsanlagen mit Membranbiologie können durch energieintensive Druckbelüftung die Partikel zwar in Schwebelage gehalten werden, aber die Tonminerale würden die Membranen zusetzen. Weitere Stufen der Sickerwasserreinigungsanlagen, wie z. B. Aktivkohleadsorption oder Ozonierung erfordern ebenfalls ein praktisch feststoffreies Abwasser.

Die großtechnisch maximale Entwässerbarkeit der Suspension kann anhand von thermogravimetrischen Messungen bestimmt werden (Kopp 2001). In Abbildung 6-7 ist für die nass-mechanischen Versuche mit dem Material der „Pohlschen Heide“ die Trocknungsrate bezogen auf das Verhältnis von Wasser zur Feststoffmasse im Probenmate-

rial während der Trocknung dargestellt. Die Auswertung der Trocknungsverläufe ergab eine maximale Entwässerbarkeit von 58 bis 60 %-TR.



**Abbildung 6-7:** Trocknungsverlauf einer Suspension aus der nass-mechanischen Aufbereitung von rückgebautem Deponat zur Bestimmung der maximalen großtechnischen Entwässerbarkeit

Nach vorheriger Konditionierung wurden Entwässerungsversuche mit einem Pilotdekanter durchgeführt. Die Eingangsdaten und Ergebnisse der Entwässerungsversuche sind in Tabelle 6-3 aufgelistet. Dort aufgeführt sind das Feinmaterial, das nass-mechanisch aufbereitet wurde, sowie die eingesetzten kationischen polymeren Flockungsmittel von Polysepar und BASF, die mit einer Konzentration von 0,2 % Wirkstoffgehalt in der Gebrauchslösung dosiert wurden, als auch Trockenrückstand und Glühverlust der Suspension und die Dosierung der polymeren Flockungsmittel. Die Ergebnisse sind dargestellt als Trockenrückstand im Zentrifugat und erreichter Abscheidegrad der Feststoffe.

**Tabelle 6-3:** Zusammenstellung von Eingangsdaten und Ergebnissen der Entwässerungsversuche

Deponat	Polymer	TR Suspension	GV Suspension	Polymer- dosierung	TR Zentrifugat	Abscheidegrad
[mm]	[-]	[%]	[%]	[kg WS/Mg TR]	[%]	[%]
0 - 60	PK1440	2,2	20,2	8,9	60,1	> 99,99
10 - 60	Zetag 8140	2,4	24,4	4,1	49,4	> 99,99

Trommeldrehzahl: 6.000 rpm; Schleuderziffer: 3080 G; Wehrscheibeneinstellung: 88 mm (Maximum)

Die Suspension aus der nass-mechanischen Aufbereitung von Deponat 0 – 60 mm konnte auf 60 %-TR entwässert werden. Der Polymerbedarf von 8,9 kg WS/Mg TR kann auf einen hohen Anteil an Feinstpartikeln zurückgeführt werden, führte allerdings auch zu einer Steigerung des Abscheidegrades. Die Suspension aus der nasstechnischen Aufbereitung von Deponat 10 - 60 mm konnte bis maximal 49,4 %-TR entwäs-



sert werden. Eine Erhöhung des Endfeststoffgehaltes auf Kosten des Abscheidegrades war nicht möglich.

Infolge einer zunehmenden Aufsatzung des Prozesswassers sowie einer möglichen Anreicherung mit Feinstpartikeln (z. B. kleiner 1  $\mu\text{m}$ ) ist der ständige Austausch eines kleinen Teils des Kreislaufwassers von ca. 10 % erforderlich. Dieses Austauschwasser muss derart gereinigt werden, dass es entweder einer kommunalen Kläranlage zugeführt oder unter Einhaltung der Grenzwerte direkt in eine Vorflut abgeschlagen werden kann.

Das bei den o. g. Entwässerungsversuchen abgetrennte Prozesswasser erfüllte die Anforderungen gemäß Anhang 51 der Abwasserverordnung sowohl an das Einleiten von Abwasser in Gewässer als auch an das Vermischen mit anderen Abwässern. Sollte beides nicht möglich sein, kann das Abwasser der vorhandenen Deponiesickerwasserbehandlungsanlage zugeführt werden. Dieses muss aber im Einzelfall überprüft werden.

## 7. Mögliche Technologiekombinationen zur Umsetzung von ELFM-Vorhaben

*Boris Breitenstein, Daniel Goldman, Anna Breitenstein, Karsten Kieckhäfer, Thomas S. Spengler*

Im Kapitel 7 erfolgt die Auswahl und Zusammenführung der in den Kapiteln 2 bis 6 vorgestellten Technologien zu technisch sinnvollen Technologiekombinationen. Es werden sechs denkbare Technologiekombinationen, im Folgenden Szenarien genannt, mit niedrigem, mittlerem und hohem Aufbereitungsaufwand definiert.

Im Abschnitt 7.1 ist das allgemeine Vorgehen zur Technologiewahl beschrieben, im Abschnitt 7.2 werden die sechs Szenarien, einerseits zur Veranschaulichung der technischen Zusammenhänge, andererseits als Grundlage für die ökonomische (s. Kapitel 8) und ökologische Bewertung (s. Kapitel 9), detailliert vorgestellt und in Abschnitt 7.3 werden Methoden zur Erfassung und Modellierung der Stoff- und Energieströme erläutert. Weiterhin dienen die Szenarien als Grundlage für die Entscheidungsunterstützung und die Handlungsempfehlungen (Kapitel 10).

### 7.1. Allgemeines Vorgehen

Zur technischen Umsetzung eines Enhanced Landfill Mining müssen die drei Schritte Umsetzung des Rückbaus (Schritt 1), Vorkonditionierung und Stoffstromtrennung (Schritt 2) und stoffstromspezifische Behandlung (Schritt 3) durchlaufen werden. Dabei stehen insbesondere für die Schritte zwei und drei unterschiedliche Technologien zur Verfügung (s. Abbildung 7-1). Die besondere Herausforderung liegt darin, einerseits verfügbare und verfahrenstechnisch sinnhafte Technologien zu kombinieren, um ein maximales Wertstoffausbringen über alle Kornklassen zu erreichen, andererseits ökonomisch und ökologisch vorteilhafte Kombinationen zu identifizieren. Die Wahl einer bestimmten Technologiekombination beeinflusst den Umfang der Behandlung der ausgebauten Materialien und damit wiederum die Anzahl, Qualität und Quantität der resultierenden Produkte und Reststoffe, die anschließend vermarktet werden können oder einer Verwertung bzw. sicheren Beseitigung zugeführt werden müssen.

Die ökonomische und ökologische Vorteilhaftigkeit eines Enhanced Landfill Mining im Vergleich zur Deponiestilllegung und -nachsorge wird maßgeblich durch die Wahl der Technologiekombination beeinflusst. Um diesen Einfluss im Rahmen der ökonomischen (s. Kapitel 8) und ökologischen Bewertung (s. Kapitel 9) analysieren zu können, sollen ausgewählte Technologiekombinationen beispielhaft bewertet werden.

### 7.2. Technologiekombinationen

Die im Folgenden betrachteten Technologiekombinationen stellen Szenarien für die Bewertung dar. Die Szenarien sind so gewählt worden, dass sie eine möglichst große Bandbreite an Technologiekombinationen mit unterschiedlichen Aufbereitungstiefen abdecken. Welche der in den Kapiteln 4 – 6 beschriebenen Technologien in welchem Szenario miteinander kombiniert werden, zeigt Abbildung 7-1. Szenario 1a und 1b stehen für einen sehr geringen Aufbereitungsaufwand. Da in diesen Szenarien große Mengen wieder abgelagert werden müssen, handelt es sich laut Definition (s. Kapitel 1) nicht um ein Enhanced Landfill Mining, sondern nur um ein Landfill Mining. Sie werden jedoch vorgestellt, da sie eine vergleichsweise einfache Möglichkeit des Deponierück-

baus und damit eine gute Untergrenze des Aufbereitungsaufwandes darstellen. Insgesamt werden sechs verschiedene Szenarien betrachtet.

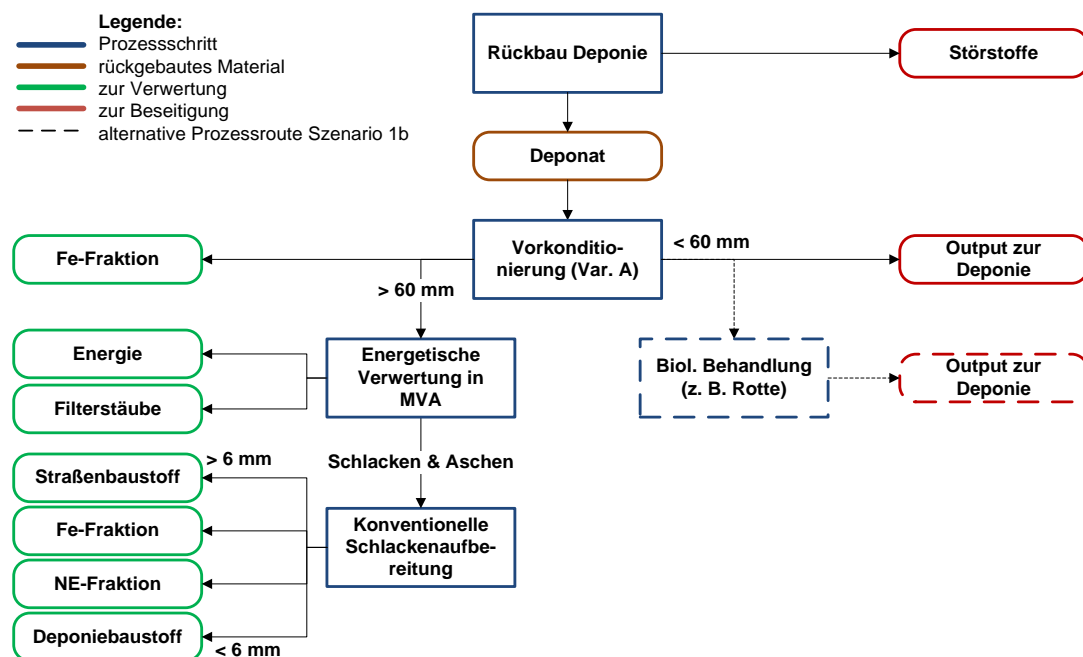
		Aufbereitungsschritte	Szenario 1		Szenario 2		Szenario 3	
			a	b	a	b	a	b
Deponat	Umsetzung Rückbau		✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Vorkonditionierung & Stoffstromtrennung		Variante A		Variante D		Variante C	Variante B
Feinfraktion	Biolog. Behandlung			✓				
	Wiedereinlagerung		✓	✓				
	Nass-mech. Feinkornaufbereitung				✓	✓	✓	✓
Grobfraktion	Verwertung in MVA & Schlackenaufbereitung		✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Verwertung in EBS-Kraftwerk & Schlackenaufbereitung				✓	✓	✓	✓
	Pyrolyse					✓	✓	✓
	Aufb. zur Erzeugung von Kunststoffen						✓	
	SBS-Erzeugung (Zementwerk)							✓

MVA: Müllverbrennungsanlage | EBS: Ersatzbrennstoff | SBS: Sekundärbrennstoff

**Abbildung 7-1:** Übersicht der Technologien, die zu Bewertungsszenarien kombiniert werden

**7.2.1. Szenario 1 – geringer Aufbereitungsaufwand**

Abbildung 7-2 zeigt die Technologiekombinationen mit geringem Aufbereitungsaufwand.



**Abbildung 7-2:** Szenarien 1a und 1b mit geringem Aufbereitungsaufwand

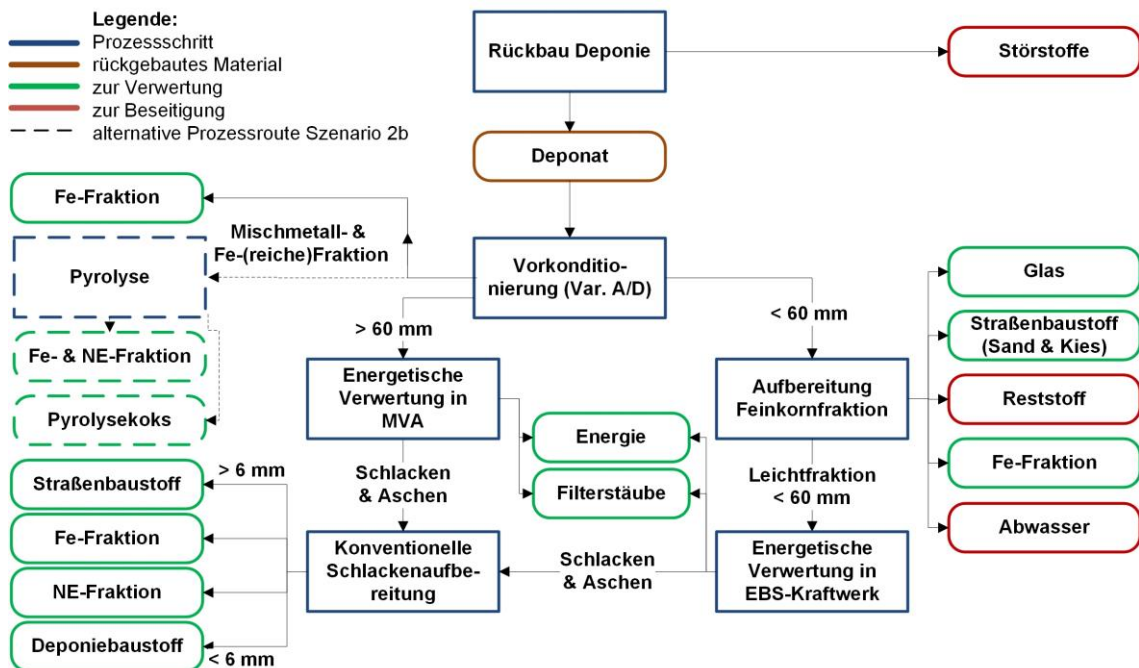
Für die Umsetzung des Rückbaus können die in Kapitel 3 beschriebenen Technologien genutzt werden. Nach einer Aussortierung von Störstoffen erfolgt die Vorkonditionierung (Variante A, s. Tabelle 4-1) des aus dem Deponiekörper ausgebauten Materials, welche mit geringem Aufwand arbeitet. Dazu werden die in Kapitel 4 beschriebenen Aufbereitungstechnologien eingesetzt.

Die über eine Zerkleinerung mittels angeschlossener Siebung erzeugte Grobfraktion > 60 mm wird einer energetischen Verwertung (s. Abschnitt 5.1) mit angeschlossener Aufbereitung der entstehenden Verbrennungsrückstände (s. Abschnitt 5.2) zugeführt. Fe- und NE-Fractionen werden über eine MVA-Schlackenaufbereitung separiert. Die dabei entstehenden mineralischen Rückstandsfraktionen können einer Verwertung als Deponie- oder Straßenbaustoff zugeführt werden.

Die bei der Siebung entstehende Feinkornfraktion < 60 mm kann entweder direkt wieder deponiert werden (s. Szenario 1a, Abbildung 7-2) oder muss bei Nicht-Einhalten der in DepV Anhang 3 beschriebenen Grenzwerte, zuvor einer biologischen Behandlung (s. Abschnitt 6.2) zugeführt werden (s. Szenario 1b, Abbildung 7-2). Verbleibt diese Fraktion auf derselben Deponie, kann durch verdichteten Wiedereinbau und die Ausschleusung der Grobkornfraktion Deponievolumen gewonnen werden. Dies ermöglicht eine Verlängerung der Betriebszeit der bestehenden Deponie. Ist jedoch eine anderweitige Nutzung der Fläche erwünscht, muss die Feinkornfraktion auf einer anderen Deponie wieder abgelagert werden.

### 7.2.2. Szenario 2 – mittlerer Aufbereitungsaufwand

Szenario 2 erweitert die in Abschnitt 7.2.1 vorgestellten Szenarien um die Behandlung der Fraktion < 60 mm. Durch die umfassende Erschließung der Wertstoffpotenziale entspricht dieses Szenario einem ELFM. Nur kleine Mengen Material bedürfen der Beseitigung.



**Abbildung 7-3:** Szenarien 2a und 2b mit mittlerem Aufbereitungsaufwand

Für Szenario 2a bleibt die Grundstruktur der Szenarien 1a und 1b erhalten (s. Abbildung 7-3). Anstelle der direkten Wiederablagerung oder biologischen Behandlung des Feinkorns < 60 mm wird eine nass-mechanische Aufbereitung integriert, welche eine technische Neuentwicklung darstellt und in Abschnitt 6.3 genauer beschrieben wird. Die mechanische Behandlung der Feinkornfraktion ermöglicht die Verwertung des größten Massenstroms und erhöht hierdurch die Wertstoffrückgewinnung. Die im Rahmen der Aufbereitung entstehende heizwertreiche Fraktion kann als Ersatzbrennstoff (EBS) in einem Ersatzbrennstoffheizkraftwerk (Abschnitt 5.3.1) energetisch verwertet werden. Die bei der energetischen Verwertung von heizwertreichen Fraktionen aus dem Grob- und Feinkornbereich entstehenden Müllverbrennungsschlacken werden analog zu Szenario 1 einer Schlackenaufbereitung zugeführt. Die mineralische Fraktion kann entsprechend ihrer Korngröße als Recyclingkies oder -sand verwendet werden. Die feinstkörnige Fraktion, die im Rahmen der Prozesswasseraufbereitung bzw. Entwässerung anfällt, muss aufgrund angereicherter Schadstoffe beseitigt werden.

In Szenario 2b wird eine erweiterte Vorkonditionierung (Variante D, Tabelle 4-1) genutzt, welche auf ein größtmögliches Metallausbringen abzielt (s. Abbildung 7-3). Die hierbei gewonnenen, stark verunreinigten metallreichen Fraktionen werden pyrolysiert (s. Abschnitt 5.1.4), um hochwertige Metallfraktionen und Pyrolysekoks zu erzeugen.

### 7.2.3. Szenario 3 – hoher Aufbereitungsaufwand

Basierend auf dem im vorherigen Abschnitt dargestellten Szenario 2 erfolgt eine Weiterentwicklung zu den Szenarien 3a (s. Abbildung 7-4, Abbildung 9-5) und 3b (s. Abbildung 7-5), welche durch höheren Aufbereitungsaufwand hochwertige Produkte erzeugen. Analog zu Szenario 2 liegt auch hier ein ELFM vor.

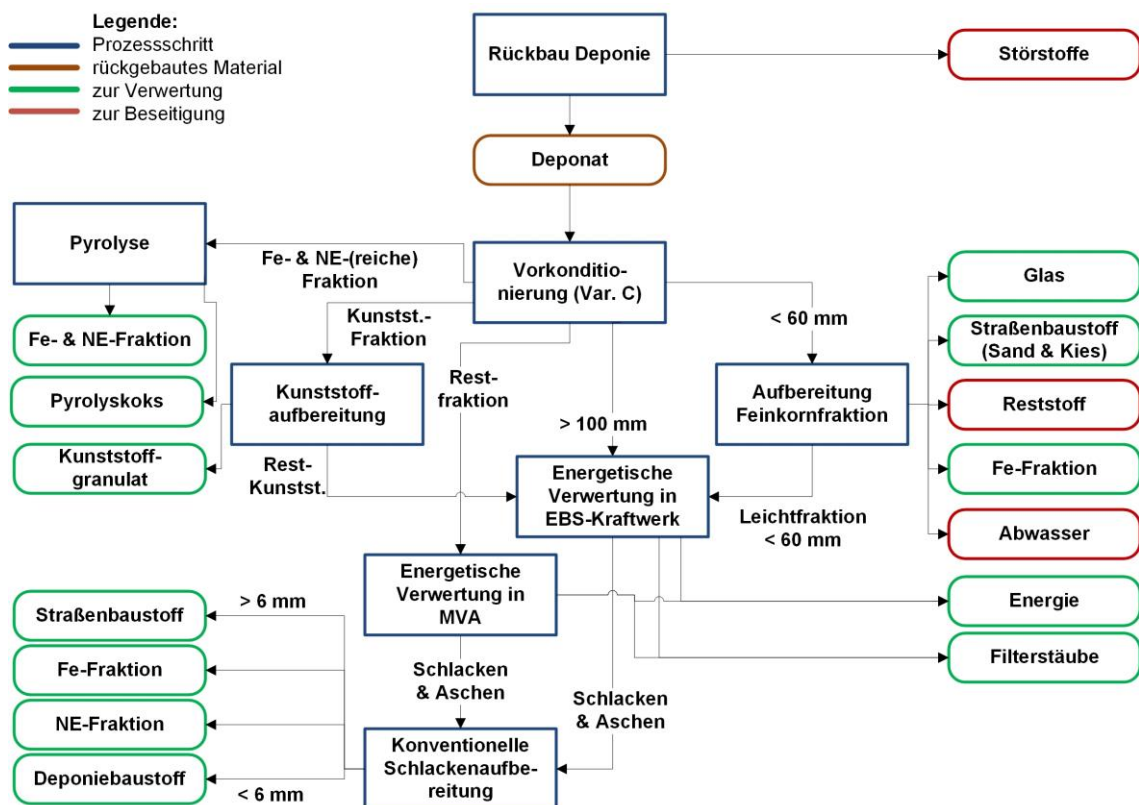
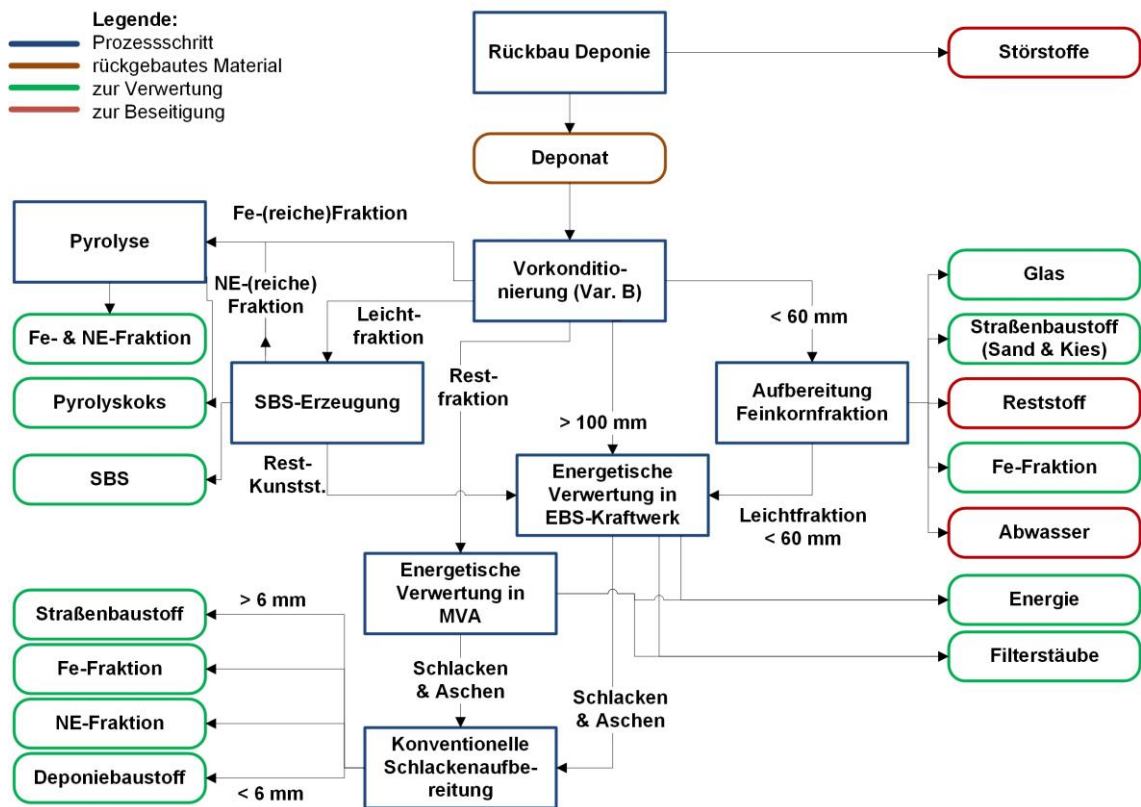


Abbildung 7-4: Szenario 3a mit hohem Aufbereitungsaufwand

Für Szenario 3a werden mittels einer aufwändigen Vorkonditionierung (Variante C, Tabelle 4-1) aus der Grobkornfraktion heizwertreiche Materialien zur energetischen Verwertung (Abschnitt 5.1), Fe- und NE-reiche Fraktionen zur Weiterbehandlung mittels Pyrolyse (Abschnitt 5.1.4) sowie eine Kunststofffraktion zur werkstofflichen Verwertung erzeugt. Diese Kunststofffraktion wird einer Verarbeitungsstufe (s. Abschnitt 5.3) zugeführt, die Regranulate (Kunststoff-Granulat) erzeugt. Die Behandlung der Feinkornfraktion sowie die Aufbereitung und Verwertung der entstehenden Rückstände der thermischen Behandlungsstufen erfolgt analog zu Szenario 2.

Eine Alternative zu Szenario 3a stellt das in Abbildung 7-5 beschriebene Szenario 3b dar. Hier erfolgt die Vorkonditionierung entsprechend der Variante B (s. Tabelle 4-1), so dass eine Fe-reiche, eine Leicht-, eine Rest-, eine heizwertreiche und eine Feinkornfraktion erzeugt werden. Die Leichtfraktion wird in eine Aufbereitungsanlage zur Erzeugung von SBS (s. Abschnitt 4.1.2) gegeben. Hier wird ein SBS für die Verwertung im Zementwerk (s. Abschnitt 5.1.4) erzeugt, sowie eine NE-reiche Fraktion und Pyrolysekoks, die nach der Pyrolyse vermarktet oder verwertet werden können, und eine heizwertreiche Restfraktion, die in eine energetische Verwertung in einer MVA oder einem EBS-Heizkraftwerk (EBS-HKW) gegeben wird (Abschnitt 5.1).



**Abbildung 7-5:** Szenario 3b mit hohem Aufbereitungsaufwand

### 7.3. Erfassung und Modellierung der Stoffströme der Szenarien

Um im Vorhinein den Einfluss der Technologiekombinationswahl auf die ökonomische und ökologische Vorteilhaftigkeit eines ELFM-Projektes bestimmen zu können, ist eine umfassende, konsistente Datenbasis erforderlich.<sup>27</sup> Für alle in Betracht kommenden

<sup>27</sup> Die nachfolgenden Ausführungen zur Stoffstrommodellierung lehnen sich teils eng an die Ausführungen in Diener et al. (2015) an.

Prozesse müssen die unterschiedlichen Stoff- und Energiebilanzen sowie Stoffeigenschaften bestimmt werden. Hierfür bietet sich die Energie- und Stoffstrommodellierung an, die mit verschiedenen Herausforderungen einhergeht:

- Erfassen aller relevanten Stoffströme über repräsentative Proben, was einerseits durch die grundsätzliche Heterogenität des Deponats, andererseits durch die mit dem Ablagerungszeitpunkt des Abfalls auf der Deponie variierenden Zusammensetzungen und Stoffeigenschaften erschwert wird.
- Für das Erstellen von Massenbilanzen für die einzelnen Teilprozesse sollte Material aus derselben Probe genutzt werden, um einen einheitlichen Bezugspunkt zu gewährleisten. Je nach Art des Versuchsaufbaus gehen folgende Schwierigkeiten einher:
  - Bei Großversuchen in bestehenden Behandlungsanlagen werden einerseits große Inputmengen benötigt, andererseits kann es aufgrund der großen räumlichen Ausdehnung zu Verlusten an Übergabestellen kommen, die so gering wie möglich gehalten werden sollten.
  - Bei Versuchen im Labor- oder Technikumsmaßstab ist eine realistische Abschätzung der Massendurchsätze sowie Energie- und Betriebsmittelverbräuche für den industriellen Maßstab erforderlich.
- Umfangreiche Qualitätsanalysen sind erforderlich, um Verwertungsmöglichkeiten der (Zwischen-)Produkte abschätzen zu können.

Sind die Massenbilanzen und Qualitätsanalysen erstellt, können diese mit Hilfe eines Stoffstrommodells für die verschiedenen Technologiekombinationen zusammengeführt werden.

Zur Modellierung von Energie- und Stoffströmen stehen einerseits verfahrenstechnische und andererseits betriebswirtschaftliche Methoden zur Verfügung. Bei der verfahrenstechnischen Modellierung werden die Veränderungen von Stoff- und Energieströmen, die durch einen bestimmten Prozess hervorgerufen werden, über mathematische Gleichungen abgebildet, wobei die Gesetzmäßigkeiten von Chemie, Physik und Thermodynamik zugrunde gelegt werden. Für mehrstufige Prozesse wird dieses Gleichungssystem schnell aufwändig und komplex, weswegen Flowsheeting-Programme entwickelt wurden, die computergestützt die Stoff- und Energiebilanzen ermitteln. Der Vorteil von Flowsheeting-Programmen ist, dass sie auf eine Vielzahl von bereits modellierten Teilprozessen aus Datenbanken zurückgreifen können. Weiterhin ermöglichen diese Programme nicht nur die Implementierung von Stoffstrommodellen, sondern auch eine anschließende Anpassung bzw. die Simulation von veränderten Prozessführungen. Eine weitere Möglichkeit der verfahrenstechnischen Modellierung sind empirisch ermittelte Transformationsfunktionen. Hierfür wird eine umfangreiche Prozessdatenbasis aus großtechnischen Versuchen benötigt, was mit den bereits beschriebenen Herausforderungen einher geht (zum vorhergehenden Abschnitt vgl. Fröhling 2005; Penkuhn 1997; Peters et al. 2002; Schatka 2011).

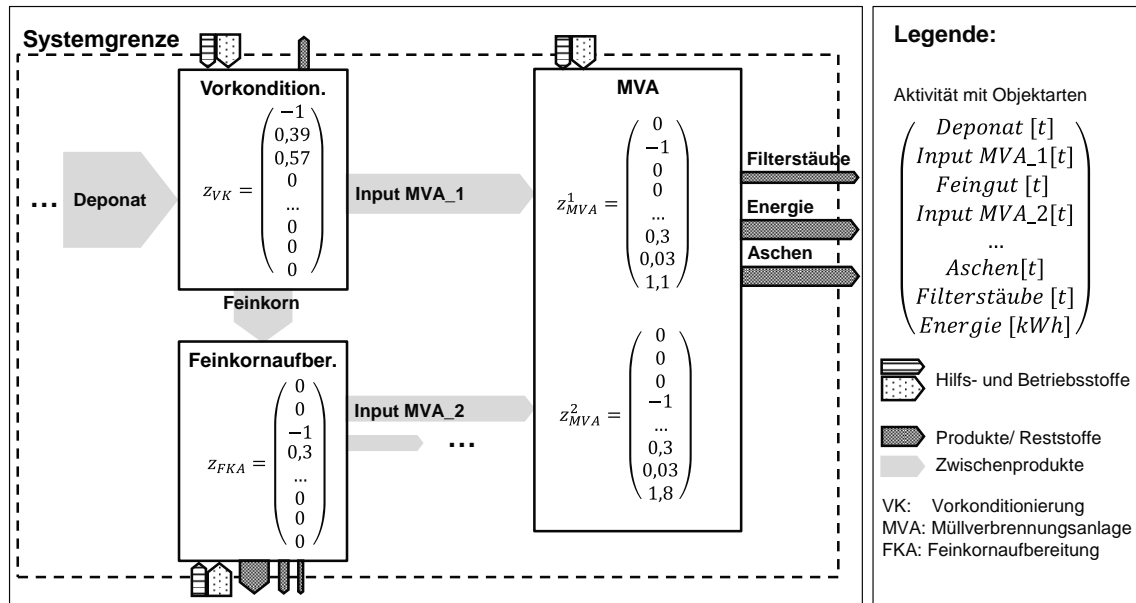
Die betriebswirtschaftliche Modellierung von Stoff- und Energieströmen von ELFM-Prozessen kann mithilfe verschiedener Methoden durchgeführt werden. Von diesen Methoden werden im Folgenden die betriebswirtschaftlichen Input-Output-Modelle und die Aktivitätsanalyse näher erläutert. Für einen ausführlichen Überblick über die Methoden der Stoffstrommodellierung kann bspw. auf Schatka (2011) und Walther (2010) verwiesen werden.

Betriebswirtschaftliche Input-Output-Modelle beschreiben das Verhältnis von Input- zu Outputstoffströmen über mathematische Funktionen. Dabei ist eine Vielzahl mathematischer Zusammenhänge bereits in Form von Produktionsfunktionen erfasst worden. In Abhängigkeit des zu modellierenden Anwendungsfalls ist demnach eine bestimmte Produktionsfunktion für das Input-Output-Modell zu wählen. Die Schwäche dieser Modellierung ist die fehlende explizite Berücksichtigung naturwissenschaftlich-technischer Gesetzmäßigkeiten. Engineering-Production-Functions versuchen genau diese Schwäche auszugleichen, indem Sie verfahrenstechnische Gesetzmäßigkeiten berücksichtigen. Dies führt jedoch zu einer deutlichen Erhöhung des Modellierungsaufwands zur Abbildung komplexer, z. B. mehrstufiger Prozesse (Fandel 2005).

Die Aktivitätsanalyse verzichtet auf mathematisch anspruchsvolle Funktionen. Zunächst wird ein Gesamtprozess in seine Teilprozesse, die sogenannten Aktivitäten, unterteilt. Anschließend kann jede Aktivität über einen Vektor beschrieben werden, der das Verhältnis von Input- zu Outputstoffströmen angibt. Dieses Verhältnis wird empirisch ermittelt. Somit können auch mehrstufige oder Kuppelproduktionsprozesse unkompliziert abgebildet werden. Eine sinnvolle Verknüpfung aller Aktivitäten ermöglicht die Ermittlung der Systemgrenzen überschreitenden Stoffströme. Dies entspricht der Gesamtmassenbilanz einer bestimmten Technologiekombination (Dyckhoff, Spengler 2007). Zur Anwendung der einzelnen Stoffstrommodellierungsmethoden können Tabellenkalkulationsprogramme (z. B. Microsoft Excel) oder auch spezielle Software-Programme (z. B. ASPEN, Umberto<sup>®</sup>) genutzt werden.

Zur Veranschaulichung der aktivitätsanalytischen Stoffstrommodellierung sowie der entsprechenden Umsetzung mit Excel und Umberto<sup>®</sup> wird im Folgenden ein vereinfachtes Beispiel vorgestellt. Abbildung 7-6 zeigt einen Ausschnitt des Fließbildes für Szenario 2a. Dargestellt sind die Prozesse Vorkonditionierung, Feinkornaufbereitung und Müllverbrennung. Von der Vielzahl an Stoff- und Energieströmen ist nur eine kleine Auswahl dargestellt, anhand derer das grundsätzliche Vorgehen verdeutlicht werden kann. Jeder Prozess wird über mindestens einen (Aktivitäts-)Vektor beschrieben. Dabei steht jede Zeile der Vektoren für eine bestimmte Fraktion (Objektart). Inputs werden mit negativem, Outputs mit positivem Vorzeichen angegeben. Beispielsweise ist die Objektart „Input MVA\_1“ ein Output der Vorkonditionierung und somit im Vektor mit positivem Vorzeichen dargestellt. Für die MVA ist diese Objektart ein Input, was zu einem negativen Vorzeichen führt. Die konkreten Input- und Outputmengen sind empirisch ermittelt worden. Jeder Aktivitätsvektor ist auf eine Tonne Hauptinput normiert. Der Grund für die Modellierung der Müllverbrennungsanlage über zwei verschiedene Aktivitätsvektoren liegt in der unterschiedlichen Qualität der beiden Inputstoffe. Die Fraktion „Input MVA\_2“, welche in der Feinkornaufbereitung entsteht, weist einen höheren Heizwert auf, als „Input MVA\_1“ aus der Vorkonditionierung, weswegen erstere bei sonst annähernd gleichen Bedingungen mehr Energie produziert. Dieser Unterschied kann mit Hilfe zweier Aktivitätsvektoren abgebildet werden.





**Abbildung 7-6:** Fließbildausschnitt zur Veranschaulichung der aktivitätsanalytischen Stoffstrommodellierung

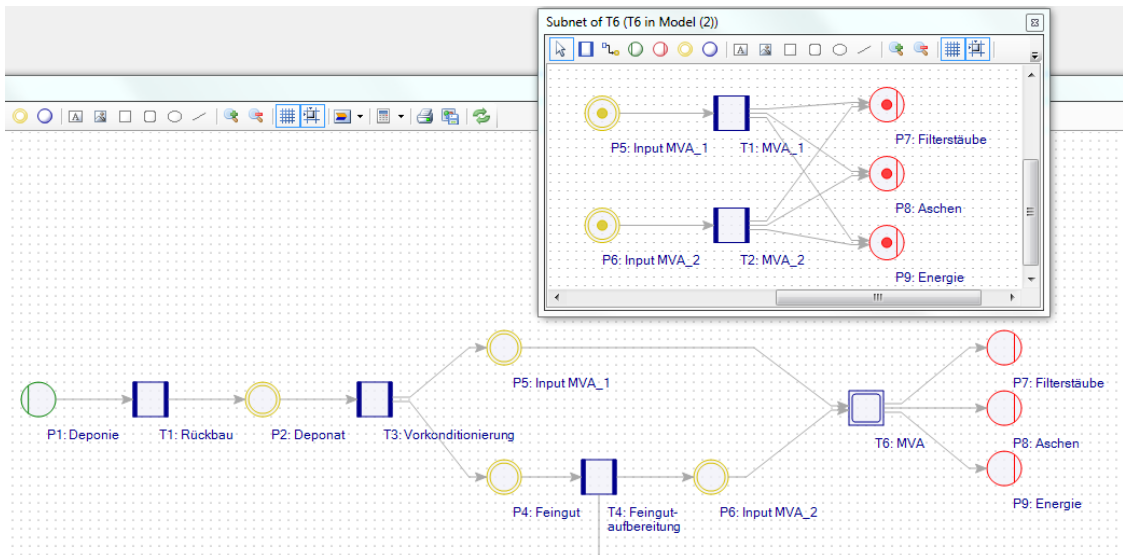
Die Umsetzung dieser Systematik mit Excel zeigt Abbildung 7-7. Um die Gesamtbilanz für Szenario 2a zu berechnen, werden die Aktivitätsvektoren mit dem jeweiligen Aktivitätsniveau (entspricht dem Durchsatz der Aktivität) multipliziert und anschließend addiert. Die Gesamtbilanz gibt die Stoffströme an, die die Systemgrenze überschreiten. Im Beispiel wird eine Tonne Deponat über die Prozessschritte Vorkonditionierung, Feinkornaufbereitung und MVA in 0,17 t Asche, 0,02 t Filterstäube und 0,74 kWh Energie umgewandelt. Zwischenprodukte, wie z. B. das Feinkorn, welches zwischen den Prozessen weiter gereicht wird, erscheinen nicht in der Gesamtbilanz. Gesamtbilanz und Durchsätze sind eine wichtige Datengrundlage für die Bewertung. Im Rahmen der ökonomischen Bewertung können hierüber die prozess- und stoffstromabhängigen Zahlungen bestimmt werden (s. Kapitel 8).

**Tabelle 7-1:** Stoffstrommodellierung mit Excel - Szenario 2a

Objektarten	Einheit	Aktivität 1		Aktivität 2		Aktivität 3		Aktivität 4		Gesamtbilanz
		Durchsatz VK	VK	Durchsatz FKA	FKA	Durchsatz MVA_1	MVA_1	Durchsatz MVA_2	MVA_2	
Deponat	t	1,00	-1,00	0,57	0,00	0,39	0,00	0,17	0,00	<b>-1,00</b>
Input MVA_1	t		0,39		0,00		-1,00		0,00	
Feinkorn	t		0,57		-1,00		0,00		0,00	
Input MVA_2	t		0,00		0,30		0,00		-1,00	
...			...		...		...		...	
Aschen	t	0,00	0,00	0,30	0,30	<b>0,17</b>				
Filterstäube	t	0,00	0,00	0,03	0,03	<b>0,02</b>				
Energie	kWh	0,00	0,00	1,10	1,80	<b>0,74</b>				

Für die ökologische Bewertung empfiehlt sich eine detailliertere Stoffstrommodellierung mit einer spezifischen Software. Zur Ermittlung der in Kapitel 9 vorgestellten Ergebnisse wurde die Software Umberto<sup>®</sup> genutzt. Diese ermöglicht sowohl eine lineare Verknüpfung der Aktivitäten, so wie hier mit Excel umgesetzt, als auch komplexere Ver-

knüpfungen über Transformationsfunktionen oder verschachtelte Aktivitäten. Abbildung 7-7 zeigt ein Stoffstromnetz für das hier beschriebene, vereinfachte Beispiel. Die MVA wurde verschachtelt modelliert. Die zwei unterschiedlichen Aktivitätsvektoren der MVA sind über ein Subnetz abgebildet. Der Vorteil von Umberto<sup>®</sup> ist, dass nach der Stoffstrommodellierung auch direkt eine Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment) angeschlossen werden kann. Hierfür greift Umberto<sup>®</sup> auf eine sehr umfangreiche Datenbank zurück, die die Vorketten einer Vielzahl von Prozessen umfasst.



**Abbildung 7-7:** Stoffstrommodellierung mit Umberto<sup>®</sup>

## 8. Ökonomische Bewertung

*Anna Breitenstein, Karsten Kieckhäfer, Thomas S. Spengler*

Im Kapitel 8 erfolgt die Ermittlung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit der ELFM-Technologiekombinationen (Kapitel 7) im Vergleich mit der Alternative Deponiestillelegung und -nachsorge.

Im Abschnitt 8.1 werden die entscheidungsrelevanten monetären Größen identifiziert. Abschnitt 8.2 gibt einen Überblick über unterschiedliche Bewertungsmethoden und erläutert anschließend das gewählte Bewertungsvorgehen. In Abschnitt 8.3 wird das Bewertungsvorgehen auf das Fallbeispiel der „Pohlschen Heide“ angewendet und die Ergebnisse der ökonomischen Bewertung werden vorgestellt. Zudem erfolgt eine Analyse, wie sich die Variation ausgewählter Einflussfaktoren auf das Bewertungsergebnis auswirkt. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse werden in Abschnitt 8.4 zusammengefasst, indem Rahmenbedingungen identifiziert werden, die die ökonomische Vorteilhaftigkeit eines ELFM positiv beeinflussen. Die Ergebnisse der ökonomischen Bewertung stellen eine wesentliche Grundlage für die Entscheidungsunterstützung und die Handlungsempfehlungen dar (Kapitel 10).

### 8.1. Entscheidungsrelevante monetäre Größen

Zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit von ELFM-Projekten sind viele ökonomisch relevante Planungsgrößen zu berücksichtigen.<sup>28</sup> Da ELFM als Umweltschutzmaßnahme betrachtet werden kann, bietet sich die Identifikation und Strukturierung relevanter Größen über die VDI-Richtlinie 3800, Teil C (Ermittlung der Aufwendungen für Maßnahmen zum betrieblichen Umweltschutz) an. Die Richtlinie unterscheidet in Investitionen und laufende Aufwendungen, wobei letztere in investitionsabhängige, betriebsabhängige, Folge- und sonstige Aufwendungen unterteilt sind (VDI 2001). Walther (2010) und Spengler (1998) differenzieren betriebsabhängige Aufwendungen weiter in prozess- und stoffflussabhängige Größen. Für die Bewertung eines ELFM sind auch die einmaligen Ein- und Auszahlungen zum Ende des Planungshorizontes zu berücksichtigen, weswegen eine Erweiterung um Liquidationsein- und -auszahlungen erfolgt. Eine Übersicht der relevanten Größen ist Tabelle 8-1 zu entnehmen.

---

<sup>28</sup> Die nachfolgenden Ausführungen zu den entscheidungsrelevanten monetären Größen lehnen sich teils eng an die Ausführungen in Diener et al. (2015) an.

**Tabelle 8-1:** Entscheidungsrelevante monetäre Größen<sup>29</sup> beim Enhanced Land-fill Mining (in Anlehnung an Diener et al. 2015)

Fixe Größen	Variable Größen
<p><b>Investitionen / einmalige Auszahlungen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maschinen, Anlagen, Gebäude, Grundstücke, Installation, ...</li> <li>• Rückbauplanung und Vorbereitung (historische Erkundung, Probebohrungen, Genehmigungen, ...)</li> </ul> <p><b>Investitionsabhängige Auszahlungen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reparatur, Wartung, Instandhaltung (teilweise)</li> <li>• Versicherung, Steuern</li> <li>• Overhead (Gemeinkostenanteile, z. B. Verwaltung)</li> </ul> <p><b>Liquidationsein- und -auszahlungen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rückbau von Anlagen und Infrastruktur zur Umweltüberwachung</li> <li>• Verkauf von Maschinen und Anlagen zum Restwert</li> <li>• Verkauf freigewordener Fläche</li> <li>• Verkauf neu gewonnenen Deponievolumens</li> </ul>	<p><b>Prozessbedingte Auszahlungen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reparatur, Wartung, Instandhaltung (teilweise)</li> <li>• Führungs- und Betriebspersonal</li> <li>• Umweltüberwachung der im Rückbau befindlichen bzw. noch nicht zurückgebauten Deponieabschnitte</li> </ul> <p><b>Stoffstrombedingte Ein- und Auszahlungen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verkauf von Produkten (inkl. Energie)</li> <li>• Entsorgung von Reststoffen</li> <li>• Transport und Lagerung von Materialien</li> <li>• Zukauf von Hilfs- und Betriebsstoffen</li> </ul>

Die **Investitionen** eines ELFM-Projektes setzen sich aus Auszahlungen für die Planung und Vorbereitung des gesamten Vorhabens sowie aus Auszahlungen (z. B. für Maschinen und Anlagen) zur Realisierung der gewählten Technologiekombination zusammen. Für letztere ist zu prüfen, ob eigene Anlagen genutzt, fremde Anlagen gemietet oder in neue Anlagen investiert werden muss. Für eigene Anlagen sind in Abhängigkeit der Investitionssumme regelmäßige Auszahlungen für Reparatur, Wartung und Instandhaltung (Auszahlungen für Maßnahmen, die in regelmäßigen, zeitlichen Abständen vorgenommen werden müssen, unabhängig vom Durchsatz), Versicherung, Steuern und Administration zu tätigen. Diese **investitionsabhängigen Zahlungen** stellen eine fixe Größe dar, da sie nicht von der durchgesetzten Menge des jeweiligen Prozesses abhängen.

Die Höhe variabler Ein- und Auszahlungen wird von der Stoffstrommenge und -qualität sowie von dem Prozessdurchsatz beeinflusst. **Stoffstrombedingte Einzahlungen** entstehen durch den Verkauf von Produkten, **stoffstrombedingte Auszahlungen** durch die Entsorgung von Reststoffen, die Beschaffung von Hilfs-, Betriebsstoffen und Energie sowie durch Materiallagerung und -transport. Die Höhe der Auszahlungen für

<sup>29</sup> Das Begriffspaar „Ein- und Auszahlungen“ bezieht sich auf den Zahlungsmittelbestand (Bestand an liquiden Mitteln) des betrachteten Unternehmens. Einzahlungen führen somit zu einer Erhöhung und Auszahlungen zu einer Verringerung des Zahlungsmittelbestandes. Für eine detaillierte Erläuterung der Begriffe des Rechnungswesens vgl. Müller (2006), Kapitel 4.

den Transport bestimmter Fraktionen hängt neben der Menge auch gleichzeitig von der Transportentfernung zwischen den verschiedenen Anlagen ab. **Prozessbedingte Auszahlungen** hängen vom Durchsatz des jeweiligen Prozesses ab. Aus strategischer Perspektive zählen dazu Auszahlungen für Reparatur, Wartung und Instandhaltung (Auszahlungen, die vom Durchsatz abhängen), Personal, sonstige Gemeinkostenanteile sowie Umweltüberwachung der im Rückbau befindlichen bzw. noch nicht rückgebauten Deponieabschnitte. Letztgenannte kommen dadurch zustande, dass für die noch nicht zurückgebauten Deponieabschnitte alle Maßnahmen vorgenommen werden müssen, die auch während der Stilllegung und Nachsorge zu tätigen sind (z. B. Sickerwasser-, Gasfassung und -reinigung, Monitoring etc.). Mit dem Rückbaufortschritt verringert sich die Höhe dieser Auszahlungen, da der Deponiekörper immer kleiner wird.

Am Ende eines ELFM-Projektes kommt es zu **Liquidationsauszahlungen**, da Anlagen und Infrastruktur, die für die Umweltüberwachungsmaßnahmen auf der Deponie erforderlich waren, zurückgebaut werden müssen. **Liquidationseinzahlungen** können durch den Verkauf von Anlagen oder Maschinen, die noch einen Restwert aufweisen, den Verkauf der frei gewordenen Fläche oder des frei gewordenen Volumens erzielt werden. Der Verkauf der Fläche zur anderweitigen Nutzung ist nur möglich, wenn ein vollständiger Rückbau der Deponie erfolgt. Werden Restfraktionen auf derselben Deponie wieder eingebaut oder hat nur ein Teilrückbau stattgefunden, besteht die Möglichkeit, das frei gewordene Deponievolumen zur erneuten Deponierung von Abfällen zu vermarkten. Hierbei ist zu beachten, dass die ggf. notwendige Nachsorge der auf dem Deponiegelände verbleibenden Abschnitte bzw. der wieder eingelagerten Restfraktion den erzielbaren Verkaufspreis mindern kann.

Als reguläre Maßnahme nach dem Ende der Deponiebetriebsphase wird bisher die Deponiestilllegung und -nachsorge durchgeführt. Sie ist zwingend erforderlich, sofern kein Deponierückbau oder ELFM der Deponie geplant ist. Mit der Stilllegung und Nachsorge gehen ebenfalls (Ein- und) Auszahlungen einher, die der Deponiebetreiber tragen muss. Diese werden durch einmalige Auszahlungen für die temporäre und die dauerhafte Oberflächenabdeckung bzw. -abdichtung und regelmäßige Auszahlungen über den gesamten Stilllegungs- und Nachsorgezeitraum für Sickerwasser- und Deponiegasbehandlung, Wartung und Instandhaltung von deponieinternen Anlagen und Infrastruktur, für Monitoring von Gas, Sickerwasser und Grundwasser und ggf. für Maßnahmen zur Beseitigung akut auftretender Auswirkungen auf die Schutzgüter bestimmt (s. Abbildung 8-3, linker Bereich). Einen Überblick über monetäre Größen, die im Rahmen der Deponiestilllegung und -nachsorge anfallen, geben Stegmann et al. (2006).

## 8.2. Methoden zur Bewertung von Investitionsalternativen

Ein Deponiebetreiber ist verpflichtet, nach Ende der Ablagerungsphase die Deponiestilllegung und -nachsorge vorzunehmen. Alternativ dazu hat er die Möglichkeit ein ELFM durchzuführen. Für beide Alternativen sind hohe Anfangsauszahlungen (z. B. für die Oberflächenabdeckung oder die Anschaffung von Maschinen) zu tätigen, die zu späteren Zeitpunkten mit weiteren Ein- und Auszahlungen einhergehen.<sup>30</sup> Somit handelt es sich um zwei Investitionsalternativen, deren relative Vorteilhaftigkeit über den

---

<sup>30</sup> Bei der Deponienachsorge kommt es in der Regel nur dann zu Einzahlungen, wenn spezielle Nachnutzungsprogramme installiert wurden (z. B. Photovoltaik-Anlage oder Biogasanlage).

Vergleich einer monetären Zielgröße zu bestimmen ist.<sup>31</sup> In Abschnitt 8.2.1 wird zunächst ein allgemeiner Überblick über Methoden der Investitionsrechnung gegeben, die sich zur Ermittlung der Vorteilhaftigkeit von Investitionsalternativen eignen. In Abschnitt 8.2.2 wird die Ermittlung der für die Investitionsrechnung erforderlichen Daten erläutert. In Abschnitt 8.2.3 erfolgt die Vorstellung des gewählten Bewertungsvorgehens für den Vergleich von ELFM mit Deponiestillegung und -nachsorge.

### 8.2.1. Methoden der Investitionsrechnung für Vorteilhaftigkeitsentscheidungen bei einer Zielgröße

Die Investitionsrechnung ermöglicht die Bewertung von Investitionsalternativen und unterstützt somit die Entscheidungsfindung. Sie stellt im Rechnungswesen eine Sonderposition dar, da sie nicht als kontinuierliche, sondern nur als einmalige Rechnung vorgenommen wird (Loew 2001). Methoden, die sich zur Bewertung der Vorteilhaftigkeit von Investitionsalternativen anhand einer monetären Zielgröße eignen, lassen sich in zwei Klassen einteilen, die sich bezüglich des berücksichtigten Zeitaspekts unterscheiden (s. Abbildung 8-1): die statischen und die dynamischen Verfahren der Investitionsrechnung (Götze 2014).



**Abbildung 8-1:** Überblick über Methoden der Investitionsrechnung (in Anlehnung an Götze 2014)

#### Statische Methoden der Investitionsrechnung

Statische Methoden der Investitionsrechnung berücksichtigen lediglich einen Zeitabschnitt, der einer theoretischen durchschnittlichen Periode entspricht. Hierfür werden alle Zahlungen des gesamten Nutzungszeitraums auf diese durchschnittliche Periode umgelegt, anhand derer die Vorteilhaftigkeit der Investitionsalternative berechnet werden kann. Die verschiedenen Methoden der statischen Investitionsrechnung unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Zielgröße. Hierzu zählen die Kostenvergleichsrechnung, die Gewinnvergleichsrechnung, die Rentabilitätsvergleichsrechnung sowie die statische Amortisationsrechnung. Der Vorteil der statischen Methoden liegt in der einfachen Berechenbarkeit sowie in der Anschaulichkeit für die Praxis. Nicht berücksichtigt wer-

<sup>31</sup> Für die Definition und Charakterisierung von Investitionsentscheidungen vgl. Götze (2014), Kapitel 2.

den aufgrund der Durchschnittsbildung die Zeitpunkte zu denen Kosten oder Erlöse anfallen, was insbesondere dann relevant wird, wenn sich Mengen, Preise oder Zinsen im Zeitverlauf verändern (Götze 2014).<sup>32</sup>

### Dynamische Methoden der Investitionsrechnung

Dynamische Methoden der Investitionsrechnung berücksichtigen alle Ein- und Auszahlungen einer Investitionsalternative über den gesamten Nutzungszeitraum (mehrere Perioden). Da beispielsweise Einzahlungen von heute mehr wert sind als von morgen (Zeitpräferenz), müssen finanzmathematische Transformationen in Form von Auf- bzw. Abzinsung vorgenommen werden, bevor Ein- und Auszahlungen verschiedener Zeitpunkte zusammengefasst oder verglichen werden können. Eine bekannte Methode zur dynamischen Investitionsbewertung ist die Kapitalwertmethode. Der Kapitalwert, welcher die monetäre Zielgröße dieser Methode darstellt, kann als Summe aller diskontierten Ein- und Auszahlungen bezeichnet werden, die mit der Umsetzung einer Investition einhergehen. Diskontierung bedeutet, dass alle Zahlungen auf den Zeitpunkt, zu dem der Kapitalwert gebildet werden soll, auf- oder abgezinst werden. Dieser Zeitpunkt stellt in der Regel den Beginn eines Planungszeitraums dar, d. h. dass eine Abzinsung der Zahlungen vorgenommen wird. Ist der Kapitalwert einer Investitionsalternative größer null, liegt eine absolute Vorteilhaftigkeit vor. Beim Vergleich von zwei oder mehr Alternativen ist eine relative Vorteilhaftigkeit für die Alternative gegeben, die den höchsten Kapitalwert aufweist. Weitere Methoden der dynamischen Investitionsrechnung sind die Annuitätenmethode, die interne Zinssatz-Methode, die dynamische Amortisationsrechnung, die Vermögensendwertmethode, die Sollzinssatzmethode und die Methode der vollständigen Finanzpläne. Der Rechenaufwand der dynamischen Methoden ist geringfügig höher als der der statischen. Da die dynamischen Methoden aufgrund der mehrperiodigen Betrachtung eine höhere Realitätsnähe aufweisen, sind diese den statischen Methoden vorzuziehen (Götze 2014).<sup>33</sup>

#### **8.2.2. Ermittlung der erforderlichen Daten mittels Investitions- und Kostenschätzung**

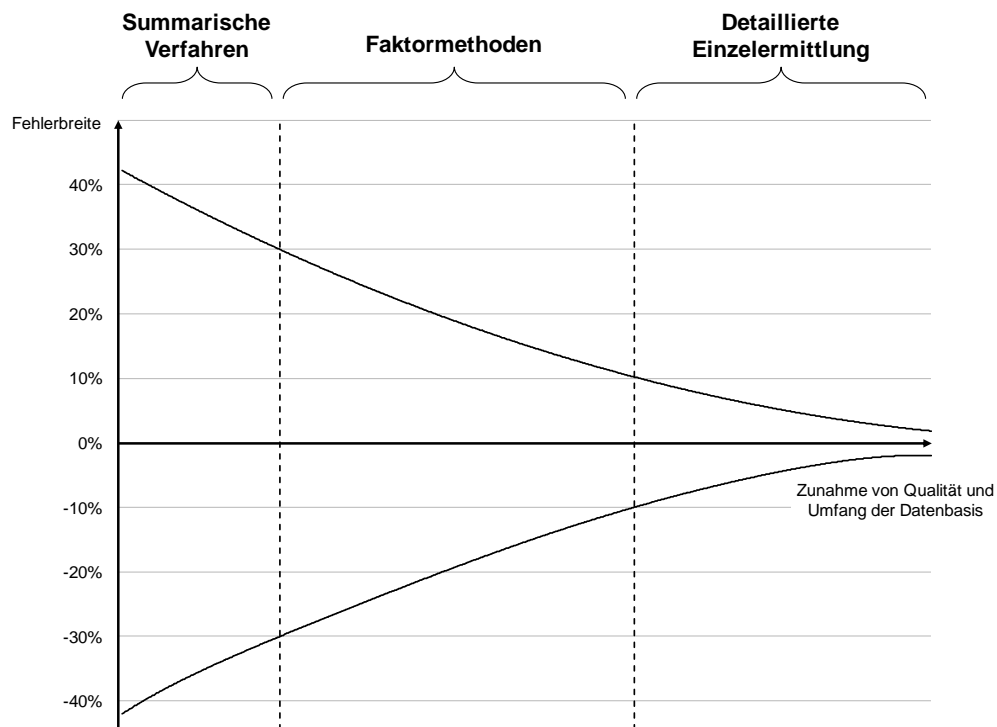
Es gibt mehrere Möglichkeiten, die erforderlichen Größen für die ökonomische Bewertung von ELFM sowie Deponiestilllegung und -nachsorge zu ermitteln: Einerseits können konkrete Angebote eingeholt werden, z. B. für die Kosten der Rückbauplanung und -vorbereitung oder für spezielle Maschinen. Andererseits bieten sich in einem frühen Planungsstadium Investitions- und Kostenschätzungsmethoden an.<sup>34</sup> Über Investitionsschätzungsmethoden, wie z. B. die Zuschlagsfaktormethode, kann auf Basis von bekannten Maschineninvestitionen über Zuschlagsfaktoren das Volumen der Gesamtinvestition berechnet werden. Zu berücksichtigen ist, dass Investitionsschätzungen in einem frühen Planungsstadium mit hohen Unsicherheiten einhergehen. So ist beispielsweise bei dem Einsatz der Faktormethode mit einer Fehlerbreite von +/- 30 % zu rechnen (s. Abbildung 8-2).

---

<sup>32</sup> Für ausführliche Erläuterungen der statischen Investitionsrechenmethoden vgl. Götze (2014), S. 56ff und Becker (2008), S. 41ff.

<sup>33</sup> Für ausführliche Erläuterung der dynamischen Methoden der Investitionsrechnung vgl. Götze (2014), S. 73 ff und Becker (2008), S. 58ff. Für eine Diskussion der statischen im Vergleich mit den dynamischen Investitionsrechnungsmethoden vgl. Breuer (2012), S. 76ff.

<sup>34</sup> Für einen Überblick über Investitions- und Kostenschätzungsmethoden vgl. Geldermann (2014), Kapitel 4 und 5.



**Abbildung 8-2:** Genauigkeit der Ergebnisse verschiedener Investitionsschätzungsverfahren (in Anlehnung an Peters, Timmerhaus 1991 und Schatka 2011)

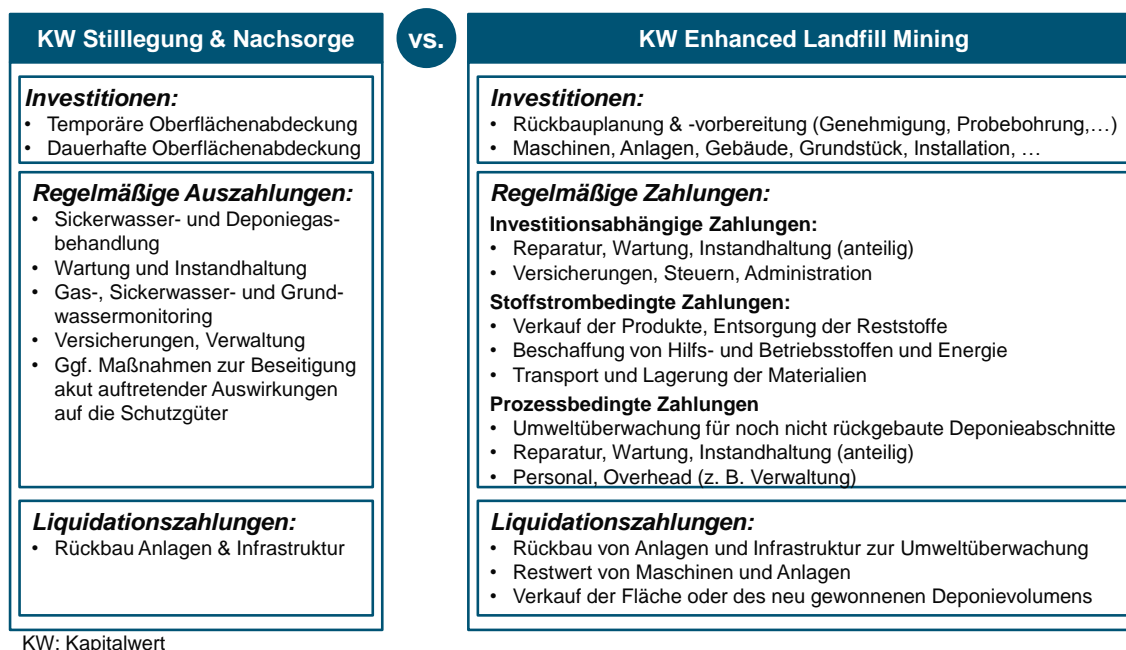
Für die Schätzung der Betriebskosten kommen mehrere Methoden zum Einsatz. Die investitionsabhängigen Größen werden über einen Prozentsatz von der Gesamtinvestitionssumme bestimmt. Für die Berechnung der variablen Größen werden die Stoff- und Energieströme mit einbezogen. Hierfür werden die Gesamtmassenbilanzen der Technologiekombinationen sowie die Durchsätze der einzelnen Technologien mit Hilfe der aktivitätsanalytischen Stoffstrommodellierung ermittelt, wie in Abschnitt 7.3 erläutert. Die stoffstrombedingten Zahlungen werden über die Multiplikation der Massen mit den entsprechenden Preisen (marktseitige Informationen) und die prozessbedingten Zahlungen über die Multiplikation mit Kostensätzen (interne Informationen) berechnet. Die Höhe der regelmäßigen Auszahlungen für den Weiterbetrieb der Umweltüberwachung für noch nicht rückgebaute Deponieabschnitte sowie Auszahlungen, die für den Rückbau von Anlagen und Infrastruktur zur Umweltüberwachung am Ende des Deponierückbaus anfallen, sollten dem Deponiebetreiber bekannt sein. Für erstgenannte ist zu berücksichtigen, dass kontinuierlich mit dem Rückbaufortschritt die zu überwachenden Deponieabschnitte kleiner und die damit einhergehenden Kosten geringer werden. Die Höhe der Liquidationseinzahlungen durch Volumen- oder Flächenverkauf richtet sich nach dem erzielbaren Volumen- bzw. Grundstückspreis. Für die Ermittlung des Kapitalwerts der Deponiestilllegung und -nachsorge kann der Deponiebetreiber auf die Daten zurückgreifen, die für die Rückstellungsberechnungen vorliegen.



### 8.2.3. Vorgehen zur Bewertung von ELFM im Vergleich zur Deponiestille- gung und -nachsorge

Die Grundidee des gewählten Bewertungsvorgehens ist, den Wert der Investitionsalternative ELFM mit dem Wert der Alternative Deponiestilllegung und -nachsorge zu vergleichen<sup>35</sup>. Aufgrund des sehr langen Planungshorizonts und der damit einhergehenden hohen Wahrscheinlichkeit für schwankende Preise und Nachfragemengen, sind hierfür die dynamischen Methoden der Investitionsrechnung vorzuziehen. Als Ziel- bzw. Vergleichsgröße wird der Kapitalwert (s. Abschnitt 8.2.1) gewählt. Da ein Deponiebetreiber in jedem Fall Deponiestilllegung und -nachsorge betreiben muss, sofern kein Deponierückbau erfolgt, stellt diese Alternative den maßgeblichen Vergleichswert dar. Somit ist ein ELFM dann ökonomisch vorteilhaft, wenn der Kapitalwert des ELFM größer ist, als der Kapitalwert für Deponiestilllegung und -nachsorge. Zu beachten ist, dass voraussichtlich beide Kapitalwerte negativ sind, da in beiden Fällen höhere Aus- als Einzahlungen auftreten.

Die jeweiligen Kapitalwerte berechnen sich als Summe aller auf den Planungszeitpunkt (t = 0) abgezinsten Ein- und Auszahlungen über alle Perioden. Das Bewertungskonzept mit allen zu berücksichtigenden Ein- und Auszahlungen beider Alternativen zeigt Abbildung 8-3, ausführliche Erläuterungen zu den ELFM-Größen finden sich in Abschnitt 8.1.



**Abbildung 8-3:** Bewertungskonzept – Vergleich der Kapitalwerte von ELFM und Stilllegung und Nachsorge

Die Umsetzung des geschilderten Vorgehens zum Kapitalwertvergleich erfolgt mit Hilfe eines hierfür entwickelten Excel-Tools. Über eine Eingabemaske (s. Tabelle 8-2) können projektspezifische Daten in das Excel-Tool eingetragen sowie eine manuelle Variation von Einflussgrößen vorgenommen werden. Weitere Arbeitsblätter ermöglichen die projektspezifische Ermittlung der einzelnen Ein- und Auszahlungen für die in Abschnitt

<sup>35</sup> Die nachfolgenden Ausführungen zum Bewertungsvorgehen lehnen sich teils eng an die Ausführungen in Diener et al. (2015) an.

8.1 vorgestellten Zahlungskategorien. Auf Basis der eingegebenen Daten erfolgt die automatisierte Berechnung der Kapitalwerte für die sechs ELFM-Szenarien und die Deponiestilllegung und -nachsorge. Da der berechnete Kapitalwert aufgrund der teils unsicheren Daten ebenfalls unsicher ist, besitzt das Excel-Tool die Funktion Sensitivitätsanalysen<sup>36</sup> vorzunehmen. Hierüber kann die Robustheit des Ergebnisses bei Variation verschiedener Einflussgrößen getestet werden. Je nach Einstellung können hierüber auch Break-Even-Analyse durchgeführt werden. Im Gegensatz zu regulären Break-Even-Analysen wird im Excel-Tool ein relativer Vergleich von ELFM und Stilllegung und Nachsorge vorgenommen, über den ermittelt werden kann, wie sich eine Einflussgröße verändern muss, damit ELFM ökonomisch vorteilhaft wird. In Abschnitt 8.3 erfolgt eine Veranschaulichung dieses Vorgehens für ein beispielhaftes ELFM-Projekt.

**Tabelle 8-2:** Eingabemaske TönsLM-Bewertungstool

Parameter	Wert
<b>Allgemeine Einstellungen</b>	
Kalkulationszinssatz	6%
Bezugsjahr für Preise, Investitionen & Gehälter	2015
Restwert Maschinen und Anlagen am Ende der Lebensdauer [%]	10%
Betriebsweise mobile Anlagen	2-Schicht normal
Betriebsweise stationäre Anlagen	3-Schicht normal
<b>Charakteristika Deponie und -nachsorge</b>	
Deponievolumen [m <sup>3</sup> ]	3.000.000
Deponiegrundfläche [m <sup>2</sup> ]	270.000
Oberfläche des noch nicht temporär abgedeckten Deponieabschnitts [m <sup>2</sup> ]	54.000
Dichte des deponierten Abfalls [t/m <sup>3</sup> ]	0,86
Einbaudichte der wieder eingelagerten Feinfraktion < 60 mm [t/m <sup>3</sup> ]	1,20
Deponiemasse [t]	2.580.000
Nachsorgekostenszenario	Durchschnittlich
Zeitpunkt Ende Deponiebetriebsphase = Start Stilllegung	2016
Dauer Deponiestilllegungsphase [a]	10
Nachsorgedauer [a]	30
Art der Sickerwasserbehandlung	Sickerwasserbehandlung vor Ort
Art der Deponiegasbehandlung	aktive Gasfassung und thermische Gasbehandlung
In-Situ-Stabilisierung?	keine
<b>ELFM-Szenario-Einstellungen</b>	
ELFM-Szenario	Szenario 3b: hoher Aufwand, SBS-Erzeugung
Beginn des ELFM	2016
Rückbau-Kapazität [t/a]	500.000
Rückbaudauer [a]	5
Fertigstellung des Rückbaus	2021
Preisszenario	Realistische Preise
Preissteigerungsrate für Anlagen, Personal etc.[%/a]:	2%

<sup>36</sup> Für weitergehende Informationen zu Sensitivitätsanalysen vgl. Götze (2014), S. 388ff.

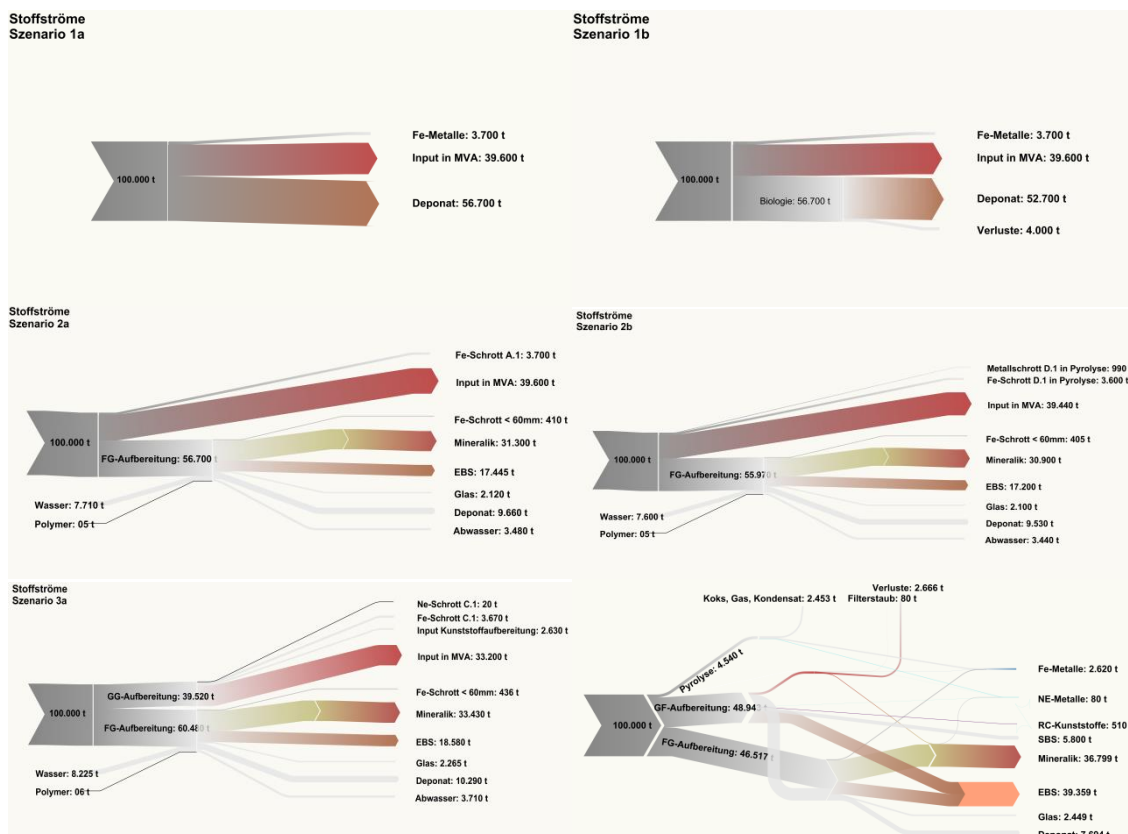
Parameter	Wert
Standard-Preissteigerungsrate für Rohstoffe [%/a]	2%
<b>Preis-Einstellungen</b>	
Wert Deponievolumen [€/m <sup>3</sup> ]	15
Wert rückgewonnene Fläche [€/m <sup>2</sup> ]	10
Preis für die Deponierung des Feinkorns [€/t]	-30
Basispreis Fe-Schrott [€/t]	170
Basispreis NE-Schrott [€/t]	1000
Basispreis Abgabe an EBS-Kraftwerk [€/t]	-47,5
Basispreis Abgabe an MVA [€/t]	-59,5
Behandlungskosten Pyrolyse [€/t]	-180
Kiespreis [€/t]	3
Sandpreis [€/t]	3
Was soll nach dem Rückbau geschehen?	frei gewordenes Volumen zur erneuten Deponierung nutzen
<b>Kapitalwert:</b>	
<b>Enhanced Landfill Mining</b>	<b>-129.020.139</b>
<b>Deponienachsorge</b>	<b>-67.696.298</b>
<b>Differenz KW ELFM - KW Deponienachsorge</b>	<b>-61.323.841</b>

### 8.3. Ergebnisse der ökonomischen Bewertung und Analyse der Einflussfaktoren auf die ökonomische Vorteilhaftigkeit eines beispielhaften ELFM-Projektes

#### 8.3.1. Datengrundlage

Die ökonomische Bewertung des beispielhaften ELFM-Projektes basiert auf Massenbilanzen und weiteren Prozessdaten, die im Rahmen des Forschungsprojektes TönsLM für das Material der Deponie „Pohlsche Heide“ des Entsorgungszentrums des Kreises Minden-Lübbecke erhoben worden sind. Die betrachtete Deponie befindet sich siedlungsfern in einem Landschaftsschutzgebiet. Die Deponiefläche beträgt ca. 27 ha, auf denen ca. 3 Mio. m<sup>3</sup> Siedlungsabfall lagern. Für die Ausgestaltung und Bewertung der ELFM-Szenarien werden einige Annahmen getroffen (s. Abbildung 8-4), von denen die wichtigsten kurz erläutert werden:

Für die sechs Szenarien aus Kapitel 7 sind folgende Massenbilanzen im Excel-Tool hinterlegt worden (s. Abbildung 8-4):



**Abbildung 8-4:** Massenbilanz Szenario 1a, 1b, 2a, 2b, 3a und 3b

Dabei ist zu berücksichtigen, dass für die ökonomische Bewertung die Perspektive des Deponiebetreibers eingenommen wird und somit alle Stoffströme, die zur weiteren Behandlung an andere Anlagen abgegeben werden, die Systemgrenze verlassen und in den dargestellten Abbildungen nicht weiter aufgeschlüsselt werden.

Aufgrund des strategischen Planungshorizonts der ökonomischen Bewertung des beispielhaften ELFM-Vorhabens für die Deponie „Pohlsche Heide“ wird davon ausgegangen, dass alle eingesetzten Anlagen optimal betrieben werden. Insbesondere bei der mobilen Vorkonditionierung ist auf die korrekte Beschickung von Shredder und Sieben zu achten, um den erwünschten Siebwirkungsgrad zu erreichen. Wie sich die Gesamtmassenbilanz verändert, wenn von der vorgesehenen Betriebsweise abgewichen und schneller beschickt wird (zugunsten größerer Durchsätze), zeigen die Massenbilanzen in Abschnitt 9.2.

Das Tool bietet die Möglichkeit im Abschnitt „Allgemeine Einstellungen“ aus unterschiedlichen Schichtsystemen auszuwählen. Für die folgenden Berechnungen wurde ein Zwei-Schicht-System für mobile und ein Drei-Schicht-System für stationäre Anlagen gewählt. In beiden Fällen liegen 250 Betriebstage zugrunde, was für ersteres zu 4.000 und für letzteres Schichtsystem zu 6.000 Betriebsstunden im Jahr führt.

Zur Ermittlung des Kapitalwerts der Deponiestilllegung und -nachsorge wurde auf Daten von Stegmann et al. (2006) zurückgegriffen. Diese haben für die einzelnen Positionen, die bei Stilllegung und Nachsorge anfallen, minimale und maximale Kostensätze angegeben. Über die Eingabemaske im Abschnitt „Charakteristika Deponie und -nachsorge“ kann das Stilllegungs- und Nachsorgekostenszenario ausgewählt werden, welches festlegt, ob die minimalen, maximalen oder deren durchschnittlichen Kostensätze gewählt werden. Im Tool sind die deponiespezifischen Werte für Sicker-

wasser, Oberfläche und Grundfläche hinterlegt, über die die entsprechenden Auszahlungen ermittelt werden können. Ebenfalls kann in der Eingabemaske die Art der Sickerwasser- und Gasaufbereitung eingestellt werden, wodurch unterschiedliche Kostensätze für die Kapitalwertberechnung der Nachsorge berücksichtigt werden. Weiterhin wird angenommen, dass die Ablagerungsphase der Deponie 2016 endet, was entweder den Startpunkt für Deponiestilllegung und -nachsorge oder aber für das ELFM markiert.

Für die Deponiestilllegung und -nachsorge werden für das Fallbeispiel die in Tabelle 8-3 dargestellten Zahlungen angenommen.

**Tabelle 8-3:** Zahlungen für die Deponiestilllegung und -nachsorge der Deponie „Pohlsche Heide“\*

Zahlungsart	Wert	Zeitpunkt
Investitionen in temporäre Oberflächenabdeckung inkl. Infrastruktur und Profilierung	-1.944.000 €	2016
Investition in endgültige Oberflächenabdichtung inkl. Infrastruktur & Rückbaumaßnahmen im Rahmen der Stilllegung	-2.098.890 €	2025
Rückbaumaßnahmen von Anlagen etc. am Ende der Nachsorgephase	-1.296.000 €	2056
Sickerwasserbehandlung bei temporärer Abdeckung	-1.807.300 €/a	jährlich
Sickerwasserbehandlung bei finaler Abdichtung	-361.460 €/a	
Deponiegasbehandlung	-162.000 €/a	jährlich
Sonstige laufende Kosten	-1.086.750 €/a	jährlich

\* Ermittelt auf Basis der Kostensätze von Stegmann et al. (2006), weswegen die hier dargestellten Werte unter Umständen stark von den tatsächlichen Werten der „Pohlschen Heide“ abweichen können.

Daraus ergibt sich ein Kapitalwert für die Deponiestilllegung und -nachsorge in Höhe von ca. -67.696.300 €.

Einstellungen zu den ELFM-Szenarien können im Abschnitt „ELFM-Szenario-Einstellung“ gemacht werden. Für alle sechs Szenarien wird eine Rückbaukapazität von 500.000 t pro Jahr zugrunde gelegt, was zu einer Rückbaudauer von ca. fünf Jahren führt. Um die vorgegebene Rückbaukapazität erreichen zu können, ermittelt das Tool, wie viele Anlagen der einzelnen Aufbereitungsstufen für die verschiedenen Szenarien benötigt werden und ermittelt hierüber die Gesamtinvestition. Eine Übersicht über die benötigten Maschinen für die verschiedenen Anlagen und deren Anschaffungspreis befindet sich im Anhang 2, Tabelle A 1-1. Dort ist ebenfalls dargestellt, wie viele Maschinen konkret bei welchem Szenario für welche Anlage entsprechend der jeweiligen Anlagenkapazität benötigt werden. Das Tool bietet die Möglichkeit, den Einfluss unterschiedlicher Preisszenarien (niedrige, realistische, hohe Preise) auf das Ergebnis zu analysieren. Für die folgenden Ergebnisse wurde das realistische Preisszenario zugrunde gelegt, welches auf derzeitigen Marktpreisen basiert.

Eine weitere Auswahloption im Excel-Tool ermöglicht zu entscheiden, ob am Ende des ELFM-Vorhabens die Deponiefläche zur anderweitigen Nutzung verkauft oder das gewonnene Deponievolumen zur erneuten Einlagerung von Abfällen genutzt werden soll. Ist die Gewinnung von Deponievolumen erwünscht und erfolgt das ELFM auf Basis der Szenarien 1a und 1b, wird für das vorliegende Beispiel nach verdichteter Wiedereinlagerung der Feinkornfraktion < 60 mm eine Volumenreduktion um ca. 60 % erreicht,

sodass das frei gewordene Volumen zur erneuten Deponierung genutzt werden kann. Für die Szenarien 2 und 3 kann aufgrund des vollständigen Abtrags der Deponie das gesamte Volumen genutzt werden. Hierbei wird angenommen, dass die durch die Volumenrückgewinnung wieder nutzbare Deponie nach Beendigung des ELFM-Projekts durch den Deponiebetreiber verkauft wird und die Deponierung „frischen“ Abfalls durch den Käufer erfolgt. Der Verkaufspreis der Deponie richtet sich nach dem freien Deponievolumen: Es werden 15 €/m<sup>3</sup> gewonnenes Deponievolumen angenommen (entspricht 15 €/t bei einer Einbaudichte der neu abzulagernden Abfälle von 1 t/m<sup>3</sup>). Dieser Preis berücksichtigt, dass bei Realisierung der Szenarien 1a und 1b der Käufer aufgrund des Verbleibs der Feinkornfraktion<sup>37</sup> auf der Deponie einen geringeren Nutzen hat. Der Wert des Deponievolumens wird durch zwei Faktoren beeinflusst: 1. Die Höhe zukünftig erzielbarer Annahmepreise für die Wiedereinlagerung von Abfällen. Hierbei ist einerseits die Abfallart, andererseits die voraussichtliche Angebots- und Nachfragesituation an abzulagerndem Abfall und Deponieraum in der Region zu berücksichtigen. 2. Die Höhe der Investitionen, die getätigt werden müssten, um neues Deponievolumen zu schaffen (Grundstück, Bauwerk, Genehmigungen etc.).

Ist ein vollständiger Rückbau mit dem Ziel des Flächenverkaufs erwünscht, muss die Feinkornfraktion im Szenario 1 auf einer anderen Deponie wiederabgelagert werden. Hierfür ist ein Preis in Höhe von 30 €/t zu zahlen. Der Grundstückspreis der betrachteten Deponie wird aufgrund der ländlichen Lage mit 10 €/m<sup>2</sup> bewertet. Preise für Volumen, Fläche und Wiederablagerung können im Abschnitt „Preis-Einstellungen“ variiert werden.

Da die Bewertung aus der Perspektive des Deponiebetreibers erfolgt, werden Investitionen und Betriebskosten nur für Anlagen, die dem Deponiebetreiber gehören, also innerhalb der Systemgrenze liegen, berücksichtigt. Wird eine Fraktion zur weitergehenden Behandlung an einen externen Anlagenbetreiber abgegeben, ist – je nach Fraktionsqualität – hierfür ein Preis zu zahlen, oder aber der Deponiebetreiber erhält einen bestimmten Preis. Für Eisenschrottfractionen hoher Qualität (nach thermischer Behandlung) werden beispielsweise 170 €/t und für Nichteisenschrottfractionen hoher Qualität (nach thermischer Behandlung) 1.000 €/t angenommen. Diese Werte wurden von qualifizierten Probenehmern mittels Bemusterung ermittelt. Weiterhin wird angenommen, dass der Deponiebetreiber für die Weitergabe von heizwertreichen Fraktionen an Müllverbrennungsanlagen ca. 60 €/t und für die Weitergabe von Ersatzbrennstoffen an Ersatzbrennstoffkraftwerke ca. 48 €/t zahlen muss. Diese Preise entsprechen dem deutschen Durchschnitt 2014 (Alwast 2015). Die Kies- und Sandfraktionen, die bei der Feinkornbehandlung entstehen, können für 3 €/t verkauft werden. Weitere Annahmen können der Eingabemaske entnommen werden (s. Tabelle 8-2). Eine Übersicht über alle Preise der verschiedenen Fraktionen kann in Anhang 2, Tabelle A 1-2 eingesehen werden.

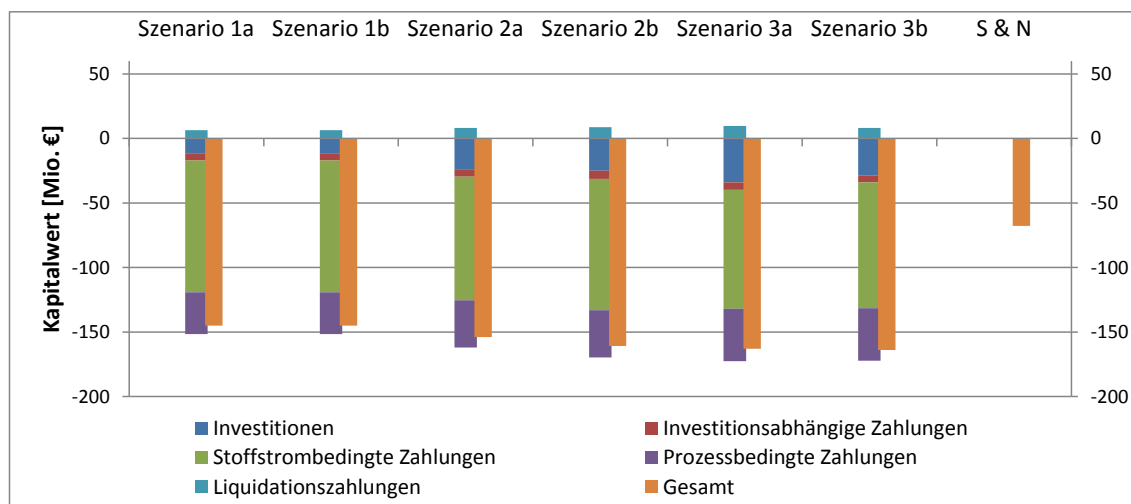
### 8.3.2. Ergebnisse der ökonomischen Bewertung und Break-Even-Analyse

Auf Basis der getroffenen Annahmen ist eine Bewertung für alle sechs ELFM-Szenarien im Vergleich mit der Deponiestilllegung und -nachsorge vorgenommen worden. Abbildung 8-5 und Abbildung 8-6 zeigen die Kapitalwerte aller sechs ELFM-

<sup>37</sup> Es wird angenommen, dass der Nachsorgeaufwand der auf der Deponie verbleibenden Feinkornfraktion für den Käufer vernachlässigbar gering ist. Entweder haben die meisten Reaktionen schon während der vorherigen Deponierung stattgefunden. Oder es würde bei hohem Organikgehalt vor der Wiederablagerung eine biologische Behandlung erfolgen (Szenario 1b).

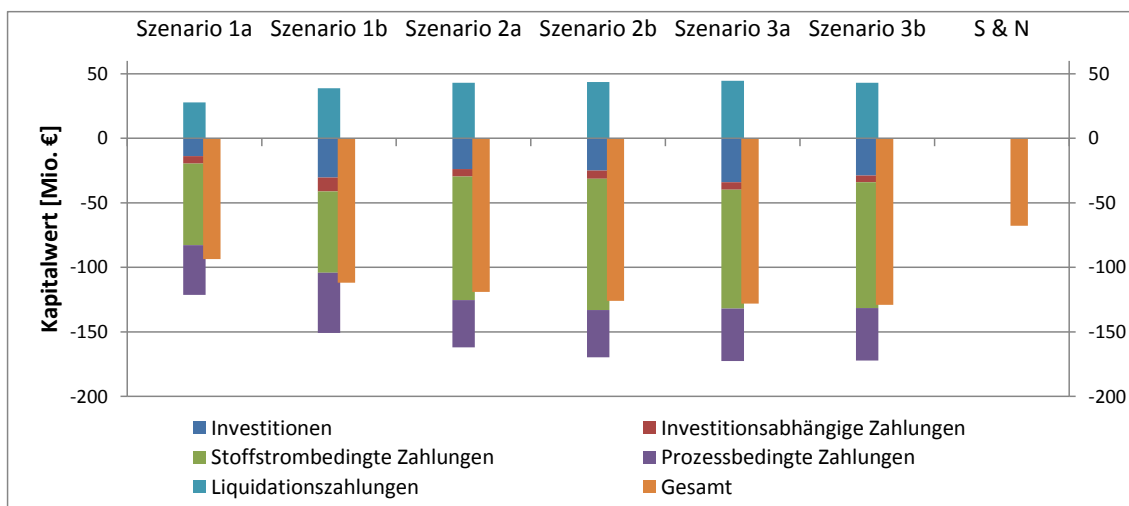
Szenarien sowie der Stilllegung und Nachsorge. Die Kapitalwerte der ELFM-Szenarien sind zugleich in die verschiedenen Zahlungskategorien aufgeschlüsselt. Der ersten Abbildung liegt hierbei das Ziel der Flächenrückgewinnung, der zweiten Abbildung das Ziel der Volumerrückgewinnung zugrunde. Es ist zu erkennen, dass die Kapitalwerte aller sechs ELFM-Szenarien in beiden Fällen geringer sind, als der Kapitalwert der Stilllegung und Nachsorge. Somit ist für die Deponie „Pohlsche Heide“ ein ELFM unter den getroffenen Annahmen derzeit ökonomisch nicht vorteilhaft. Grund hierfür ist, dass die Einzahlungen, die durch den Produkt-, Flächen- und Volumenverkauf erzielt werden können, nicht die Investitionen, Auszahlung für die Weitergabe von Zwischenprodukten und für die Entsorgung von Reststoffen ausgleichen können.

Beim Vergleich der beiden Abbildungen miteinander fällt auf, dass die Ergebnisse bei Flächenrückgewinnung insgesamt deutlich schlechter ausfallen als bei der Volumerrückgewinnung. Das liegt daran, dass die frei gewordene Fläche zu einem verhältnismäßig sehr geringen Preis verkauft wird. Hingegen stellt der Deponieverkaufspreis in Abhängigkeit des gewonnenen Volumens einen guten Mittelwert dar.



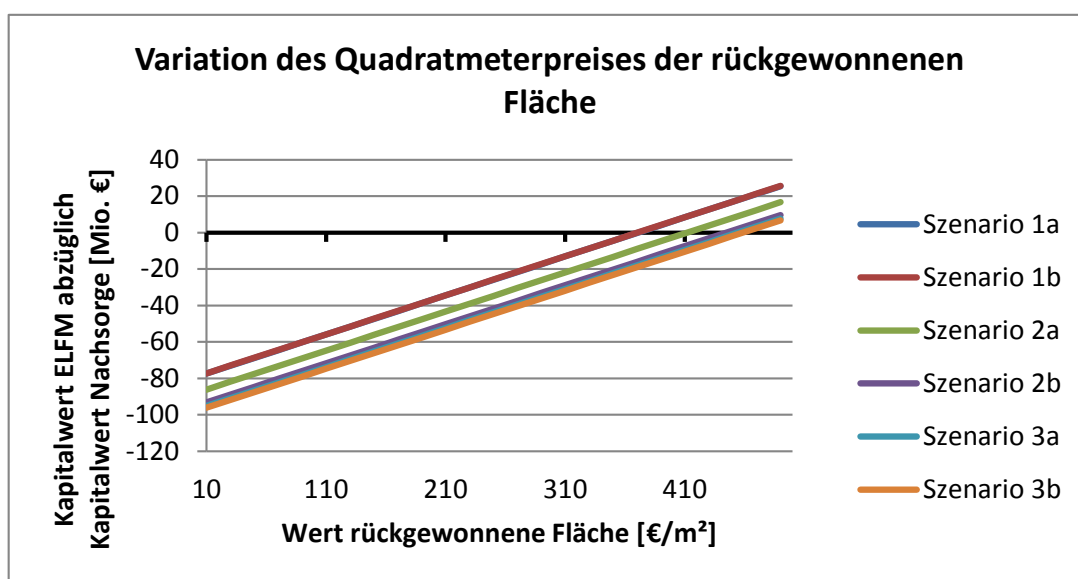
**Abbildung 8-5:** Bewertungsergebnis für die betrachteten Optionen mit dem Ziel der Flächenrückgewinnung

Beim Vergleich der Szenarien untereinander anhand Abbildung 8-6 ist erkennbar, dass Szenario 1a am besten abschneidet, da lediglich die Schritte Rückbau, Vorkonditionierung und Wiedereinlagerung (mit mobilen Aggregaten) anfallen, was mit sehr geringen Investitionen einhergeht. Szenario 1b erfordert einen zusätzlichen Schritt, die Rotte der Fraktion < 60 mm. Alle übrigen Szenarien nutzen eine aufwändige, stationäre Technik. Beim Ziel der Flächenrückgewinnung (Abbildung 8-5) liegt die Besonderheit vor, dass Szenario 1a und 1b gleich abschneiden. Dies liegt daran, dass die Feinkornfraktion direkt nach der Vorkonditionierung für einen recht hohen Preis abgegeben wird und damit der zusätzliche Behandlungsschritt in 1 b entfällt. Die Abgabe der Feinkornfraktionen führt auch zu dem verhältnismäßig großen Anteil der stoffstrombedingten Zahlungen der Szenarien 1a und 1b in Abbildung 8-5 im Vergleich zu Abbildung 8-6.



**Abbildung 8-6:** Bewertungsergebnis für die betrachteten Optionen mit dem Ziel der Volumengewinnung

Mit Hilfe von Break-Even-Analysen ist untersucht worden, wie sich die Variation eines bestimmten Einflussfaktors auf die ökonomische Vorteilhaftigkeit von ELFM gegenüber Deponiestilllegung und -nachsorge auswirkt. Eine Auswahl der untersuchten Parameter wird im Folgenden vorgestellt.



**Abbildung 8-7:** Variation Grundstückspreis

In Abbildung 8-7 ist für die Annahme, dass die Fläche rückgewonnen werden soll, der Grundstückspreis variiert worden. Dieser müsste auf ca. 350 – 430 €/m<sup>2</sup> steigen, damit ELFM gegenüber Stilllegung und Nachsorge vorteilhaft wäre. Zum Vergleich: Der Grundstückspreis in der Braunschweiger Innenstadt liegt zurzeit bei ca. 400 €/m<sup>2</sup> (www.immowelt.de, Stand Oktober 2015). In Abbildung 8-8 ist der Deponievolumenwert variiert worden. Es wird ersichtlich, dass Szenario 1a ab einem Volumenwert von ca. 30 €/m<sup>3</sup> und Szenario 1b als schlechtestes Szenario ab einem Wert<sup>38</sup> von ca.

<sup>38</sup> Zur Ermittlung des Deponievolumenwertes vgl. Abschnitt 8.3.1



45 €/m<sup>3</sup> ökonomisch vorteilhaft sind. Dies könnte eintreten, wenn das zur Verfügung stehende Deponievolumen innerhalb einer bestimmten Region knapp wird.

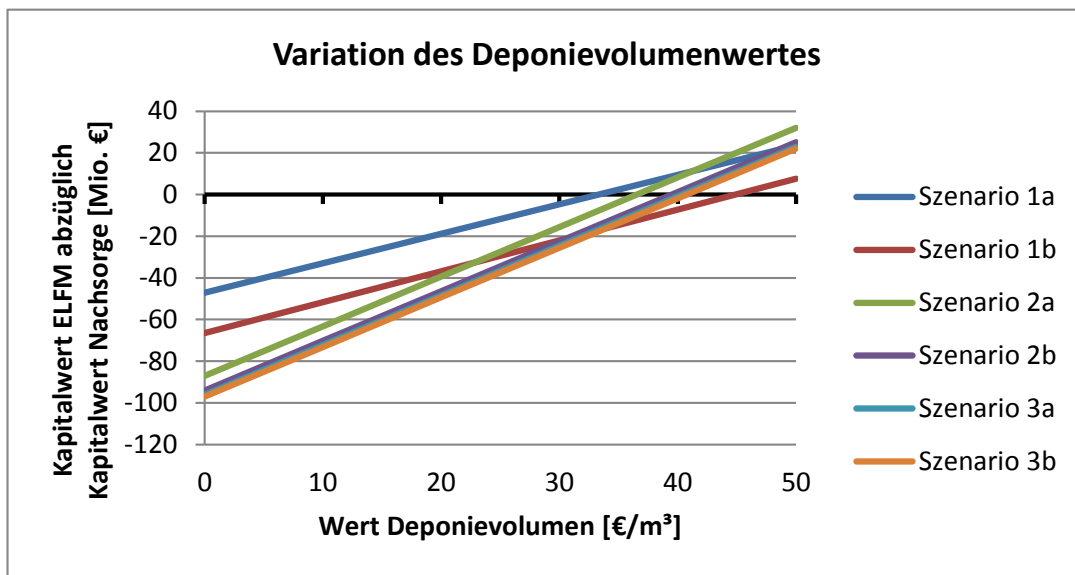


Abbildung 8-8: Variation Deponievolumenwert

Da sich im Falle des hier vorgestellten Beispiels ein Entscheider aufgrund des geringen Grundstückwertes immer für Deponievolumenschaffung entscheiden würde, werden alle weiteren Analysen auf Basis dieser Annahme durchgeführt. Großen Einfluss haben demnach die Abgabepreise an MVA (s. Abbildung 8-9) und Ersatzbrennstoffkraftwerke (s. Abbildung 8-10).

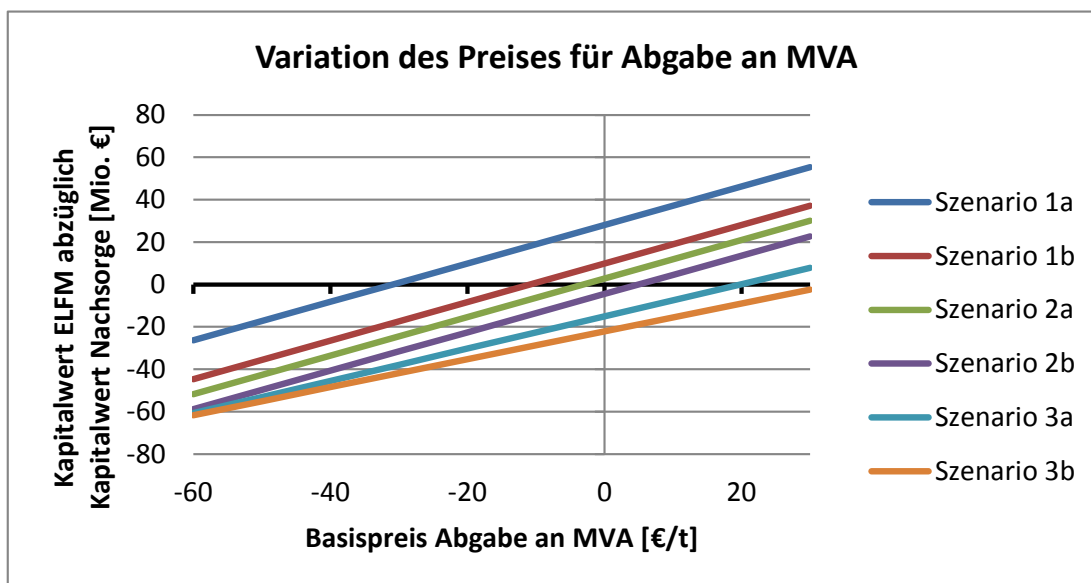


Abbildung 8-9: Variation MVA-Abgabepreis

Sinkt der Abgabepreis für die MVA unter 35 €/t, was am Spotmarkt auch heute schon auftreten kann, ist Szenario 1a ökonomisch vorteilhaft. Würde der Deponiebetreiber für die Abgabe der EBS-Fraktion ans Kraftwerk mehr als 30 €/t bekommen, wäre ELFM für das Szenario 2a ökonomisch vorteilhaft. Die durchschnittliche Preisspanne zur Abgabe von EBS an EBS-Heizkraftwerke liegt zurzeit bei -30 – -60 €/t. Ob die Kraftwerke bereit sind, Geld für EBS-Fraktionen zu bezahlen, hängt voraussichtlich von der Entwicklung des Energiepreises ab, ist jedoch kurzfristig nicht zu erwarten.

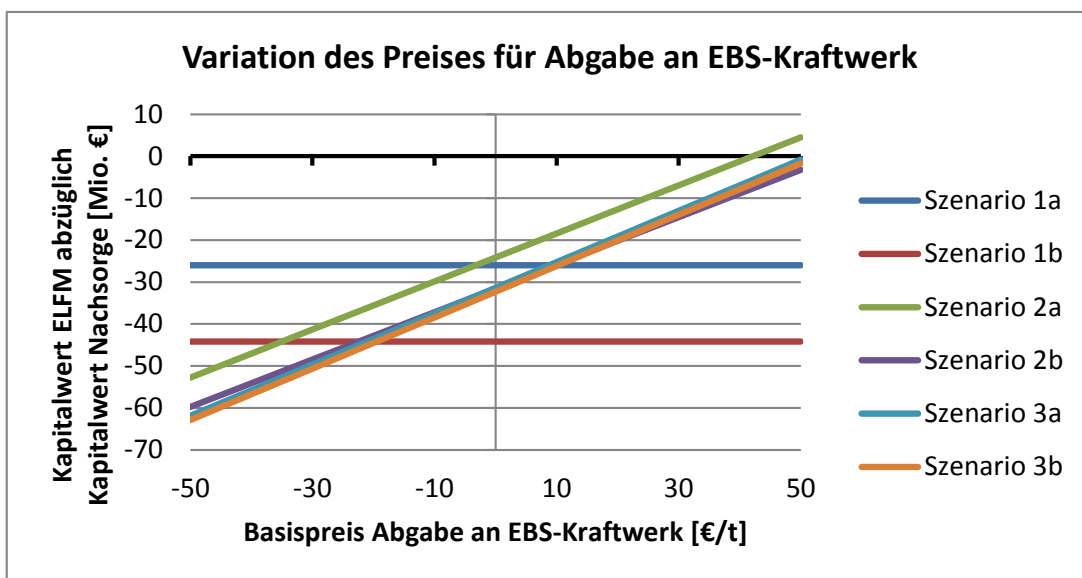


Abbildung 8-10: Variation EBS-Abgabepreis

Um einen Break-Even für die Metallfraktionen zu erhalten, ist eine Erhöhung des Fe-Preises um den Faktor 7 und für den NE-Preis um den Faktor 17 erforderlich. Dies ist als unrealistisch einzuschätzen. Der Grund für den geringen Einfluss der Metallpreisvariation sind die geringen Metallmengen im Deponat.

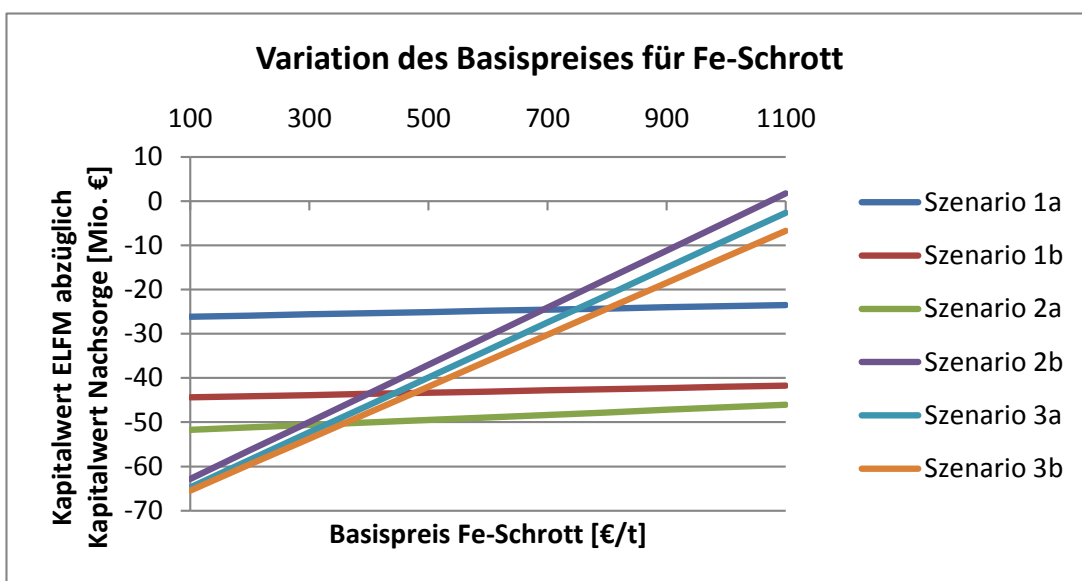


Abbildung 8-11: Variation Fe-Schrottpreis

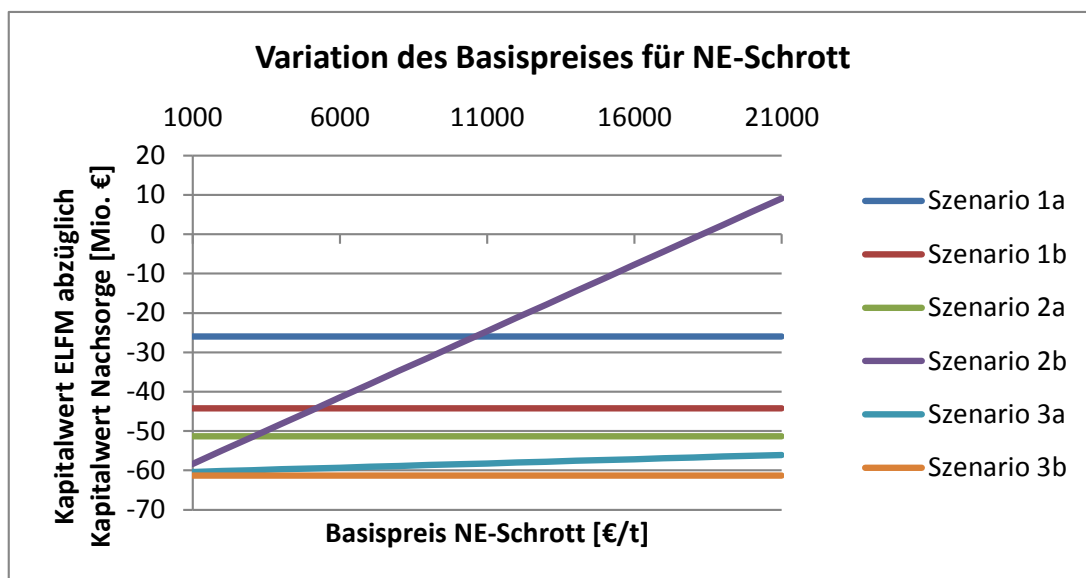


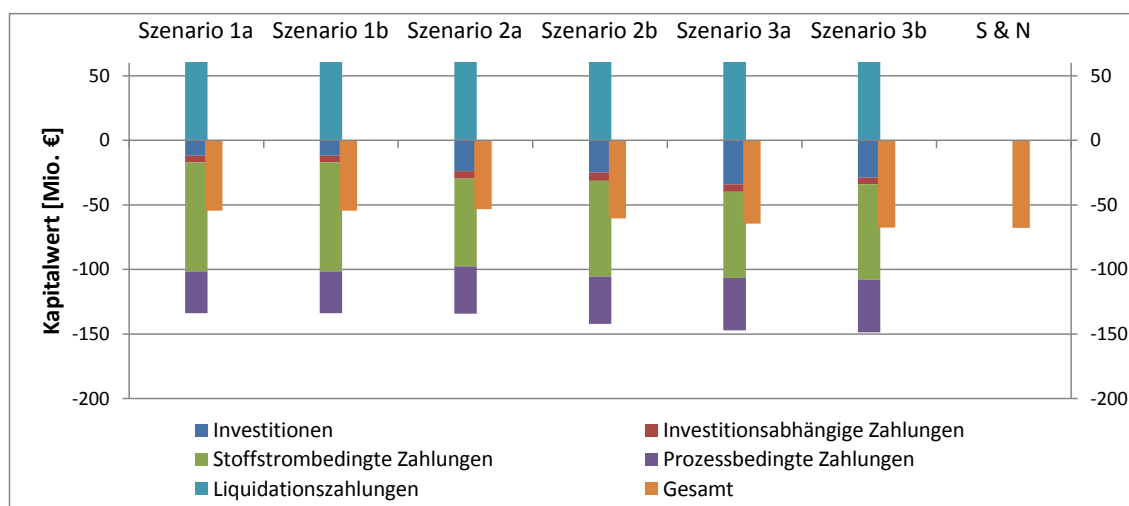
Abbildung 8-12: Variation NE-Schrottpreis

Auf Basis der eben dargestellten Break-Even-Analysen können Faktorkombinationen abgeleitet werden, die ein ELFM heute schon unter realistischen Bedingungen ökonomisch vorteilhaft werden lassen. Tabelle 8-4 gibt beispielhaft solch eine Faktorkombination für den Abgabepreis an die MVA, den Abgabepreis an ein EBS-HKW und den erzielbaren Grundstückspreis im Vergleich zu den Basisannahmen an.

Tabelle 8-4: Variation mehrerer Faktoren

Parameter	Basiswerte	variierte Werte
Basispreis Abgabe an MVA	-59,5 €/t	-40 €/t
Basispreis Abgabe an EBS-HKW	-47,5 €/t	-30 €/t
Grundstückspreis	10 €/m <sup>2</sup>	350 €/m <sup>2</sup>

Abbildung 8-13 zeigt das Ergebnis für diese Faktorkombination: Der Kapitalwert aller sechs ELFM-Szenarien ist größer als der Kapitalwert der Deponienachsorge. Somit ist ELFM im Vergleich zur Deponienachsorge ökonomisch vorteilhaft. Im Vergleich der Szenarien untereinander schneidet Szenario 1a aus ökonomischer Sicht am besten ab.



**Abbildung 8-13:** Ergebnis der Variation mehrerer Faktoren

Mit Hilfe der durchgeführten Analysen können folgende Parameter als Haupteinflussgrößen auf die Wirtschaftlichkeit eines ELFM identifiziert werden:

1. Grundstücks- bzw. Volumenwert
2. Annahmepreise von MVAs
3. Annahmepreise von EBS-HKW's

Die Metalle zählen aufgrund ihrer geringen Menge nicht zu den Haupteinflussgrößen, jedoch können sie einen Beitrag zur Wirtschaftlichkeit leisten. Beispielsweise ist die Abtrennung einer Eisenschrottfraction im Rahmen der Vorkonditionierung mit nur geringem Aufwand verbunden. Dieser lohnt sich dahingehend, dass die abgetrennte Menge anschließend nicht für 57,50 €/t in einer MVA behandelt werden muss, sondern durch den Verkauf ggf. sogar Erlöse erzielt werden können. Der Beitrag wird umso höher, je mehr Metalle in der jeweiligen Deponie enthalten und je besser die Technologien zur Rückgewinnung sind.

#### 8.4. Erkenntnisse der ökonomischen Bewertung

Die durchgeführten Analysen ermöglichen die Identifikation von Rahmenbedingungen, die zu einer ökonomischen Vorteilhaftigkeit eines ELFM führen. Diese Rahmenbedingungen werden im Folgenden vorgestellt:

Je höher die Auszahlungen für die Deponiestilllegung und -nachsorge einer bestimmten Deponie sind, desto eher ist die ökonomische Vorteilhaftigkeit eines ELFM gegeben. Hierzu können drei Mechanismen beitragen: Zum einen können die regelmäßigen Zahlungen im Rahmen der Deponiestilllegungs- und nachsorgephase höher sein als üblich, da ggf. kontinuierliche Maßnahmen zur Vermeidung von Auswirkungen auf die Schutzgüter erforderlich sind. Ein Beispiel hierfür ist austretendes Sickerwasser in Gewässer, welches eine regelmäßige Wasseraufbereitung erforderlich macht. Zum zweiten können einmalige, größere Auszahlungen erforderlich werden, z. B. wenn die Deponie nicht dem Stand der Technik entspricht oder aus anderen Gründen Sanierungsbedarf besteht. Dieser Aspekt betrifft nicht nur Deponien, sondern auch Altablagerungen, für die im Falle von Sanierungsbedarf auch ein ELFM in Betracht zu ziehen ist. Zum Dritten ist die Dauer der Nachsorgezahlungen entscheidend. Wird ein Deponiebetreiber nach 30 Jahren Nachsorgephase nicht aus der Nachsorgepflicht entlassen, fal-

len weitere Jahre regelmäßige Zahlungen an, die den Gesamtbetrag der Nachsorge erhöhen.

Je früher ein ELFM in der Deponiestilllegungs- und -nachsorgephase erfolgt, desto wirtschaftlicher ist es. Ist beispielsweise bereits die finale Oberflächenabdeckung aufgebracht worden, so ist die größte Zahlung, die im Rahmen der Stilllegungs- und -nachsorgephase anfällt, bereits getätigt. Alle nachfolgend noch anfallenden Zahlungen sind in der Regel deutlich geringer als die Zahlungen für ein ELFM. Dies gilt umso mehr, wenn in der Deponiestilllegungs- und Nachsorgephase bereits andere Nachnutzungskonzepte (wie Solarpark, Windräder) implementiert wurden.

Je wertvoller das Deponiegrundstück, desto besser fällt die Wirtschaftlichkeit eines ELFM aus. Dies ist einerseits gegeben, wenn sich die Deponie in städtischem Raum befindet. Andererseits können Infrastrukturmaßnahmen den Rückbau einer Deponie erforderlich machen. In diesem Fall wäre ein ökonomischer Vergleich des ELFM mit der Alternative „Rückbau, Transport und Einlagerung auf einer anderen Deponie“ erforderlich.

Je größer und je zeitkritischer der Bedarf an Deponievolumen in der Region ist, in welcher die betrachtete Deponie liegt, desto wertvoller ist neu geschaffenes Volumen, wodurch die Wirtschaftlichkeit eines ELFM positiv beeinflusst wird. Der Wert neu geschaffenen Deponievolumens steigt, wenn keine Fläche für einen Deponie Neubau verfügbar ist oder aber der Neubau nicht genehmigt wird.

Befinden sich Behandlungsanlagen mit freien Kapazitäten – sowohl für die Vorkonditionierung als auch für die stoffstromspezifische Behandlung – im Eigenbesitz, kann erstens ggf. auf den Bau neuer Anlagen verzichtet und somit die zu tätigen Investitionen reduziert werden. Zweitens können die eigenen Anlagen optimal ausgelastet werden. Drittens kann insbesondere durch eigene Anlagen zur stoffstromspezifischen Behandlung die Abhängigkeit von schwankenden und teils sehr hohen Annahmepreisen vermieden werden. Ähnlich positiv wirken sich freie Kapazitäten fremder Anlagen im Umkreis auf die Wirtschaftlichkeit eines ELFM aus. Durch entsprechende Verträge mit den Anlagenbetreibern können ggf. niedrige Annahmepreise realisiert werden. Unabhängig davon, ob eigene oder fremde Anlagen genutzt werden, hat die Betriebsweise von Maschinen oder Anlagen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Beispielsweise führt das Beschicken eines Trommelsiebs mit mehr Material als vorgesehen zwar zu höheren Durchsätzen, jedoch verringert sich der Siebwirkungsgrad, sodass mehr Feinkorn mit dem Grobgut ausgetragen wird. Aufgrund der hohen Annahmepreise für Grobgut in der MVA würde dies zu steigenden Aufbereitungskosten und damit zu einer Schlechterstellung des ELFM führen.

Je größer die Entfernung bestehender Anlagen zur Vorkonditionierung oder stoffstromspezifischen Behandlung zur Deponie, desto eher wird der Bau eigener Anlagen auf dem Deponiegelände wirtschaftlich. Auch bietet der Bau neuer Anlagen die Möglichkeit, den neusten Stand der Technik zu realisieren. Dies ist vorteilhaft, da gilt: je effizienter die Aufbereitungs- und Behandlungstechnologie, desto wirtschaftlicher ist das ELFM.

Ein entscheidender Einflussfaktor, der ebenfalls die Wirtschaftlichkeit eines ELFM beeinflusst, ist die Geschwindigkeit, mit der der Rückbau selbst bei einem ELFM durchgeführt wird. Aufgrund der fortdauernden Zahlungen für die Fassung und Behandlung der Deponieemissionen, die auf den im Rückbau befindlichen bzw. noch nicht zurückgebauten Deponieabschnitten entstehen, ist ein möglichst schneller Rückbau zu bevor-

zugen. Der limitierende Faktor hierbei ist entweder die Kapazität bestehender Anlagen oder die Auslastung großer, neu gebauter Anlagen, nachdem das ELFM-Projekt abgeschlossen ist. Eine mögliche Alternative könnte es sein, schnell zurückzubauen, das Material zwischen zu lagern und mit mäßiger Geschwindigkeit zu behandeln. Voraussetzung hierfür wäre, dass die Anforderungen an ein Zwischenlager deutlich geringer sind als die Anforderungen an eine Deponie in der Stilllegungs- und Nachsorgephase. Dies ist jedoch noch zu prüfen.

Es wird deutlich, dass eine pauschale Abschätzung der Vorteilhaftigkeit eines ELFM aufgrund der Vielzahl an Einflussgrößen schwierig ist. Eine Einzelfallprüfung ist unumgänglich.

## 9. Ökologische Bewertung

*Joachim Reinhardt, Günter Dehoust, Florian Knappe, Stefanie Theis, Stefanie Markwardt, Monika Dittrich*

Im Kapitel 9 erfolgt die Ermittlung der ökologischen Vorteilhaftigkeit eines ELFM im Vergleich mit der Alternative Deponiestilllegung und -nachsorge auf der Grundlage der ökologischen Bewertung der Technologieszenarien und der Stoff- und Energiestrommodellierung der Massenbilanzen (Kapitel 7).

Im Abschnitt 9.1 werden die allgemeinen Grundlagen einer Ökobilanzierung dargestellt, im Abschnitt 9.2 werden die der Ökobilanzierung zugrunde liegenden Stoffströme begründet und bilanziert. In Abschnitt 9.3 erfolgt die ökologische Bewertung der Szenarien in Hinblick auf die Wirkungskategorien Treibhauseffekt, Eutrophierung, Versauerung und kumulierter fossiler Energieaufwand. Die ökologische Bewertung (Abschnitt 9.3) und die Sensitivitätsanalyse (Abschnitt 9.4) umfasst alle durch das Vorhaben verursachten Belastungen, wie direkte Emissionen, Einsatz von Betriebsmitteln und Energie u. ä., die mit den erreichten Entlastungen durch die Bereitstellung von Recyclingprodukten oder Energie verrechnet und den von der Deponie ausgehenden Belastungen gegenübergestellt werden. Die Erkenntnisse der ökologischen Bewertung werden im Abschnitt 9.5 zusammengefasst.

Die Ergebnisse stellen eine wesentliche Grundlage für die Entscheidungsunterstützung und die Handlungsempfehlungen dar (Kapitel 10).

### 9.1. Methode der Ökobilanzierung

Als einzige anerkannte umfassende und bewährte Methode zur Bewertung der ökologischen Auswirkungen von Produkten und Systemen steht die Ökobilanz (LCA) zur Verfügung. Sie wurde im Rahmen des Normenwerks der DIN ISO 14040ff. standardisiert. Demnach richtet sich die konkrete Vorgehensweise bei der Bilanz nach der Zielsetzung und Fragestellung.

#### 9.1.1. Ziele

Das bedeutendste Ziel der ökologischen Bewertung ist zunächst die Frage, ob der Rückbau und die Aufbereitung der deponierten Abfälle ökologisch besser abschneidet als das Belassen der Abfälle in der Deponie mit den damit verbundenen Emissionen und Nachsorgemaßnahmen.

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens definierten Szenarien zum Deponierückbau (vgl. Kapitel 6) sollen außerdem vergleichend bewertet werden, um die aus ökologischer Sicht beste Technologiekombination zu identifizieren. Durch Aufzeigen der Stell-schrauben, also der Faktoren, die das Ergebnis wesentlich beeinflussen, wird der Fokus auf wesentliche Projektschritte gelenkt und damit die Optimierung der Varianten unterstützt. Darüber hinaus soll damit aufgezeigt werden, unter welchen Rahmenbedingungen ein ökologisch vorteilhaftes Landfill-Mining möglich ist bzw. wann die Ökobilanzergebnisse eher einen Weiterbetrieb der Nachsorge nahelegen.

### 9.1.2. Systembeschreibung

Für die ökologische Bewertung wird als **funktionale Einheit** die Menge Deponat gewählt, die rückgebaut wird. Darauf beziehen sich alle Ergebnisse. Wird beim Rückbau ein zusätzlicher Nutzen gewonnen, etwa durch Recycling oder energetische Verwertung einzelner Fraktionen aus dem Deponat, wird dieser dem System als Gutschrift angerechnet. Die Gutschrift erfolgt in der Höhe der Lasten, die mit der Herstellung der gleichen Menge Primärrohstoffe oder Energie verbunden wäre. Die Daten zur Beschreibung der ökobilanziellen Belastungen der unterschiedlichsten Produktions-, Energie- und Transportprozesse liegen in unterschiedlichen Ökobilanzdatenbanken, v.a. in ecoinvent.org, Studien und Bilanzen vor oder müssen im Rahmen der eigenen Bilanz erstellt werden.

Das System der Ökobilanz muss zeitlich und räumlich begrenzt werden. Die **zeitliche Begrenzung** ergibt sich aus der Zeit, in der noch mit direkten Emissionen aus der Deponie oder mit Aufwendungen für deren Nachsorge zu rechnen wäre (Vergleichsszenario ohne ELFM). Die **räumliche Begrenzung** ist zweigeteilt: Direkt wird der Raum durch die beteiligten Prozesse zur Aufbereitung des Deponats und Verwertung der daraus gewonnen Wertstoffe begrenzt. Indirekt werden die Vorketten für genutzte und ersetzte Produkte und Materialien berücksichtigt. Damit wird u. U. eine weltweite Berücksichtigung der Rohstoffgewinnung mit bilanziert.

Bei **Ökobilanzen der Abfallwirtschaft** wird der LCA-Grundsatz, alle Produkte und Materialien von der Wiege bis zur Bahre zu bilanzieren, eingeschränkt: Der Abfall, beim Enhanced Landfill Mining das Deponat, geht ohne Berücksichtigung der Aufwendungen zur Herstellung der Produkte, die zu Abfall wurden, in die Bilanz ein. Davon abgesehen werden alle Vorketten und der Verbleib aller Materialien bis zum abschließenden Verbleib berücksichtigt, soweit dies erforderlich ist, um alle relevanten ökologischen Effekte zu erfassen.

Zahlreiche Ökobilanzen zeigen, dass die klassischen, gut modellierbaren **Wirkungskategorien** Treibhauseffekt, Versauerungs- und Eutrophierungspotenzial sowie der Summenparameter Kumulierter fossiler Energieaufwand die ökologischen Auswirkungen von Abfallwirtschaftssystemen gut beschreiben können. Diese werden im Folgenden erläutert.

#### Treibhauseffekt (CO<sub>2</sub>-Äquivalente)

Der Treibhauseffekt umfasst alle treibhauswirksamen Emissionen. Diese werden, nach ihrem Strahlungspotenzial gewichtet, zu der Einheit CO<sub>2</sub>-Äquivalente aufaddiert. Die zugehörigen Wichtungs- oder Charakterisierungsfaktoren sind IPCC (2007) entnommen.

#### Versauerungspotenzial (SO<sub>2</sub>-Äquivalente)

Eine Versauerung kann sowohl bei terrestrischen als auch bei aquatischen Systemen eintreten. Die Emissionen säurebildender Substanzen werden entsprechend ihres Versauerungspotenzials gewichtet und zur SO<sub>2</sub>-Äquivalente aufsummiert. Hauptsächlichste Treiber sind Emissionen von Schwefeldioxid und NO<sub>x</sub>.

#### Terrestrisches Eutrophierungspotenzial (PO<sub>4</sub>-Äquivalente)

Die Eutrophierung steht für eine Nährstoffzufuhr im Übermaß, sowohl für Gewässer als auch für Böden. Der Eintrag in Gewässer wird hier nicht betrachtet. Zur Berechnung wird der Indikator in der Maßeinheit Phosphatäquivalente (CML 1992, Klöpffer, Renner



1995) angegeben. Als Emissionen sind hier insbesondere NO<sub>x</sub> und Ammoniak sowie Lachgas relevant.

### Kumulierter fossiler Energieaufwand (KEA fossil)

Die fossilen Energieträger und Uran sind nur in endlichen Vorräten vorhanden. Dieser Summenparameter steht deshalb für den schonenden oder verschwenderischen Umgang mit diesen energetischen Ressourcen. KEA fossil steht für die primärenergetische Bewertung und drückt die Summe der Energieinhalte aller fossilen Primärenergieträger aus. Unter der Bezeichnung KEA werden nur die so bilanzierten fossilen Primärenergieträger aufsummiert.

## 9.2. Untersuchte Szenarien

In der ökologischen Bewertung werden, wie schon bei der ökonomischen, die in Abschnitt 7.2 dargestellten Szenarien zugrunde gelegt. Während bei der ökonomischen Bewertung dabei hohe Wirkungsgrade der Aufbereitung unterstellt werden, sind für die ökologische Bewertung konservative Rahmenbedingungen gewählt worden, also weniger gute Wirkungsgrade der Aufbereitungsaggregate im Bereich der Vorkonditionierung und Grobgutkonditionierung. Daraus ergeben sich im Vergleich zu Abschnitt 8.4 sowohl bezüglich der Systemgrenzen, als auch der tatsächlichen Stoffflüsse abweichende Sankey-Diagramme, die im Folgenden dargestellt werden. Unter "Verluste" sind die Differenzen aus Input- und Outputbilanz beschrieben. Im Wesentlichen handelt es sich neben den Feuchteaustreagern um die Massen, die bei der thermischen Behandlung bzw. energetischen Verwertung in Energie umgewandelt werden.

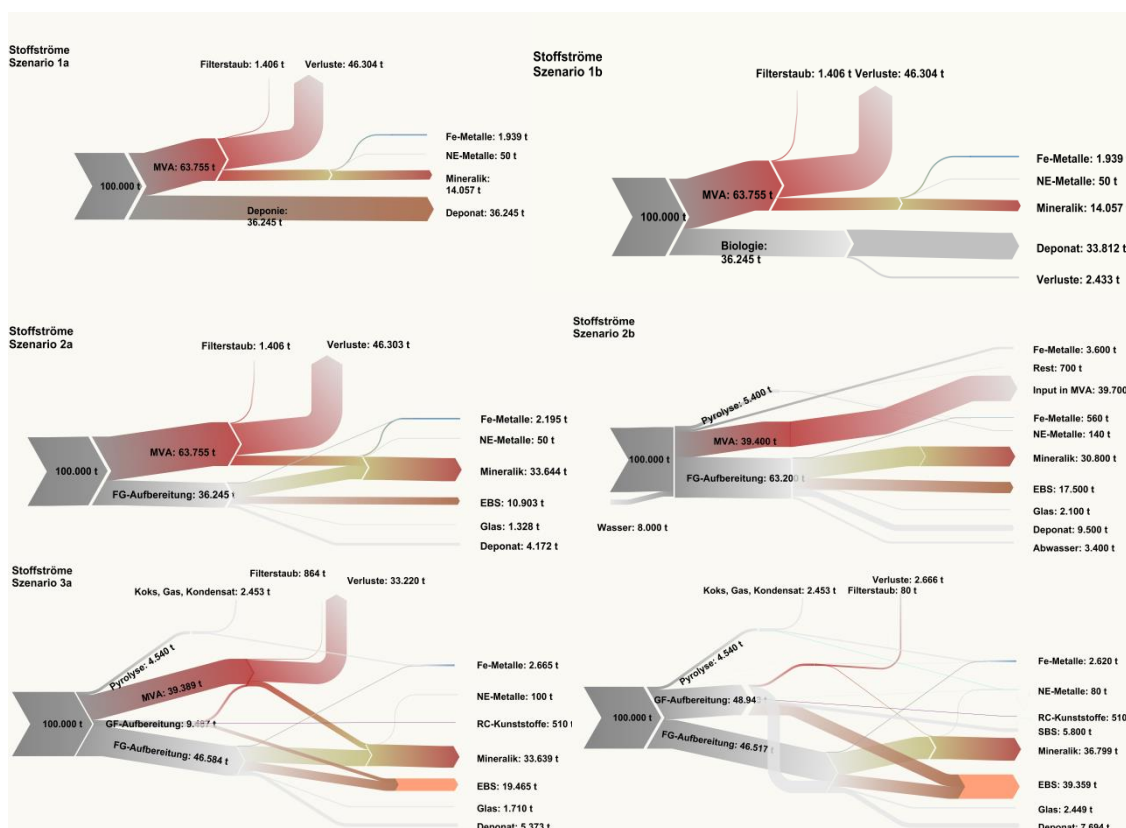


Abbildung 9-1: Sankey-Diagramm Szenario 1a, 1b, 2a, 2b, 3a\* und 3b

\* Sehr kleine Stoffströme wurden zur Steigerung der Übersichtlichkeit ausgeblendet.

### 9.3. Ergebnisse der ökologischen Bewertung

Die Ergebnisse der einzelnen Umweltkriterien werden anhand von Balkendiagrammen dargestellt. Die Lasten werden als positive Bilanzwerte nach oben, die Gutschriften als negative nach unten dargestellt. Die Darstellung erfolgt untergliedert in die wichtigsten Sektoren zum Rückbau, der Aufbereitung, der Verwertung und Beseitigung der Reste in den unterschiedlichen Szenarien. Das Endergebnis aus der Verrechnung von Lasten und Gutschriften wird rechts daneben als einfarbiger Balken dargestellt. Zeigt dieser nach oben, führt das Szenario insgesamt zu Belastungen. Ist das Gesamtergebnis dagegen negativ, führt das Szenario zu Entlastungen.

Das Ergebnis für das Referenzszenario Erhalt und Nachsorge der Deponie wird als waagerechte Linie dargestellt. Im Vergleich zum Referenzszenario ist eine Rückbauvariante dann ökologisch vorteilhafter, wenn der Endergebnisbalken unterhalb der dargestellten waagerechten Linie bleibt.

Insgesamt muss bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden, dass diese sehr stark von den zu Grunde gelegten Annahmen abhängen. Besonders deutlich wird dies beim Einfluss der in der Bilanz eingestellten Wirkungsgrade der Müllverbrennung. In der Standardbilanz wurde der derzeitige Mittelwert deutscher MVA angesetzt. Es gibt einige Anlagen in Deutschland und im Ausland, die deutlich bessere Wirkungsgrade aufweisen. Dadurch werden, wegen der hohen Stoffmengen, die in einigen Szenarien in der MVA genutzt werden, die Ergebnisse dieser Szenarien erheblich besser. Das gilt in etwas geringerem Umfang auch für andere Kriterien. Deshalb sind insbesondere die Ergebnisse aus den Sensitivitätsanalysen zu beachten (siehe Abbildung 9-7 bis Abbildung 9-10), in denen ein weites Spektrum möglicher Einzelfälle abgebildet ist.

#### 9.3.1. Wirkungskategorie Treibhauseffekt

Beim Referenzszenario überwiegen die Belastungen aus den Emissionen bei der angesetzten Gasfassungsrate von 65 %<sup>39</sup> die Einsparungen aus der Nutzung des Deponiegases (siehe die rote Linie in Abbildung 9-7).

Bei allen Rückbauszenarien werden die Belastungen durch die Verbrennung der fossilen Bestandteile im Deponat (Sektor energetische Verwertung) dominiert. Der Aufwand für den Wiedereinbau des Feinkorns und der anschließende Deponiebetrieb (Sektor Beseitigung) führt im Szenario 1a noch zu relevanten Belastungen.

Die Gutschriften werden hingegen von der Energie dominiert, die im Zuge der energetischen Verwertung produziert wird und konventionelle Energie substituiert. Mit der von Szenario 1a bis 3b zunehmenden Verwertungsambition werden auch die Gutschriften größer. Beim Szenario 2a ist das durch die Nutzung des Leichtguts aus der Feinkornaufbereitung im EBS-HKW begründet. Gleichzeitig steigt die Gutschrift für die Metalle, weil auch die Fe-Metalle aus dem Feingut verwertet werden. Im Szenario 2b werden durch die Pyrolyse höhere Rückgewinnungs- und Verwertungsquoten für Metalle erreicht. Im Szenario 3a wird ein kleiner Teil der Kunststoffe nach Sortierung stofflich

---

<sup>39</sup> Die konkret anzusetzende Gasfassungsrate sollte, wegen des hohen Einflusses auf das Ergebnis in der Wirkungskategorie Treibhauseffekt, nach Möglichkeit untersucht werden. In dieser Bilanz wird davon ausgegangen, dass Deponien mit einer funktionierenden Absaugung des Deponiegases und einer guten Zwischenabdeckung eine Gasfassungsrate von etwa 65 % erreichen (vgl. Abschnitt 9.4.1).

verwertet. Beim Szenario 3b werden Teile der heizwertreichen Fraktion zu EBS bzw. SBS aufbereitet und im Zementwerk oder im EBS-Heizkraftwerk verwertet.

Szenario 3b ist das einzige Szenario, dass in der Endbilanz relevant zur Entlastung des Treibhausgaspotenzials beiträgt. Die Szenarien 2a, 2b und 3a sind in etwa ausgeglichen. In den anderen Szenarien können die Gutschriften für die produzierte Energie die Lasten durch die Verbrennung nicht ausgleichen. Die Metallgutschriften übersteigen die Lasten, die mit deren Ausbringung verbunden sind. Die Netto-Lasten nehmen tendenziell mit steigender Verwertungsambition ab. Von Szenario 2b zu Szenario 3a und 3b erfolgt bezüglich der Metallverwertung wieder ein Rückschritt, weil in den beiden letztgenannten Szenarien weniger NE-Metalle für die Pyrolyse abgetrennt werden.

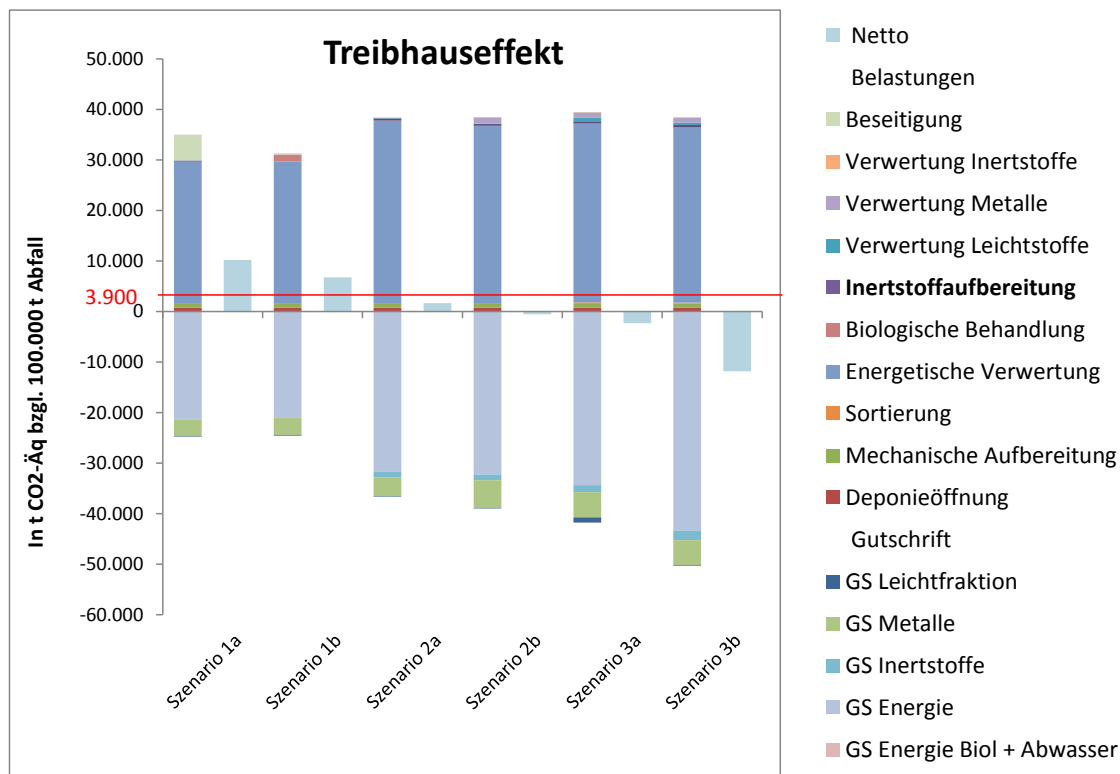


Abbildung 9-2: Ergebnisse zur Wirkungskategorie Treibhauseffekt

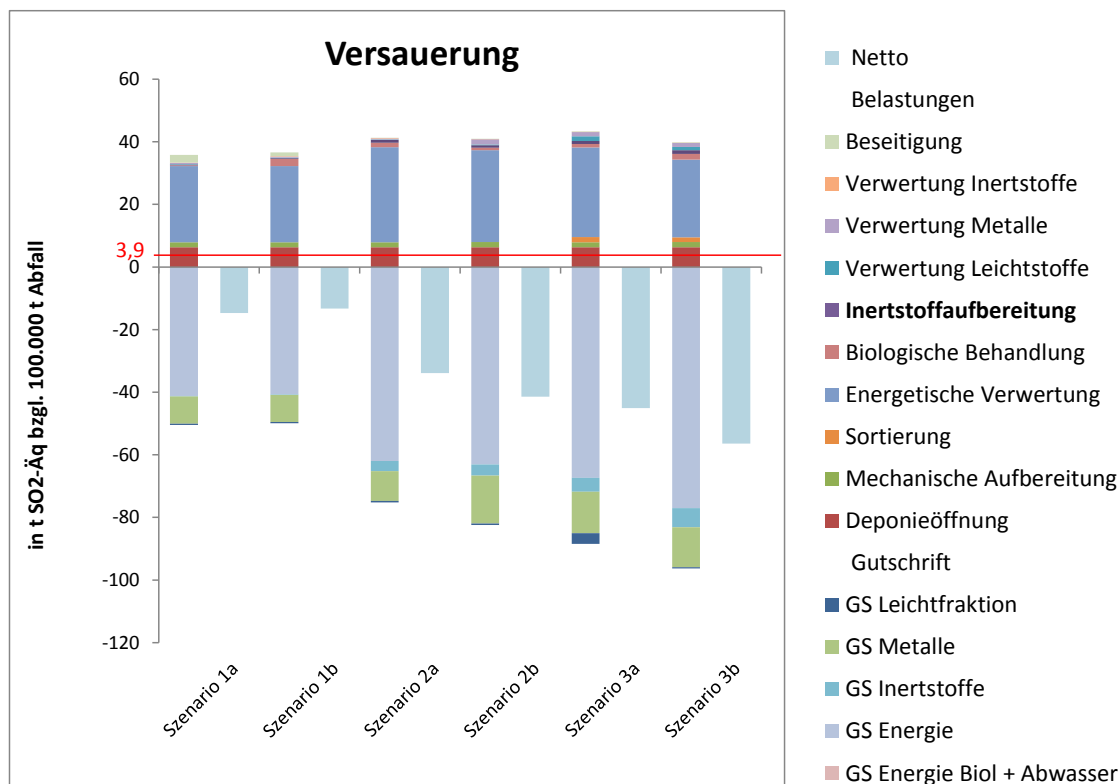
Berücksichtigt man zusätzlich den Abgleich zum Referenzszenario, sind auch die Szenarien 2a, 2b und 3a besser als das Belassen des Deponiematerials, ohne alternativ die Gasfassungsrate zu steigern.

### 9.3.2. Wirkungskategorie Versauerungspotenzial

Das Referenzszenario führt zu geringeren Nettoemissionen als beim Treibhauseffekt.

Für die EFLM-Szenarien fallen die Lasten beim Versauerungspotenzial aus der Verbrennung geringer aus als beim Treibhauseffekt, bleiben aber bestimmend, gefolgt vom Sektor Deponieöffnung. Die Erhöhung des Beitrags der energetischen Verwertung mit Szenario 2a ist auch hier deutlich sichtbar und hat dieselben Gründe wie beim Treibhauseffekt. Die Lasten aus der Feingutaufbereitung ab Szenario 2a bleiben unbedeutend. Es dominieren die Gutschriften aus der energetischen Verwertung vor dem Metallrecycling.

Nach Verrechnung von Lasten und Gutschriften zeigen alle Rückbauszenarien Netto-Entlastungen auf. Das Ergebnis verbessert sich tendenziell mit steigender Ambition bei der Verwertung.

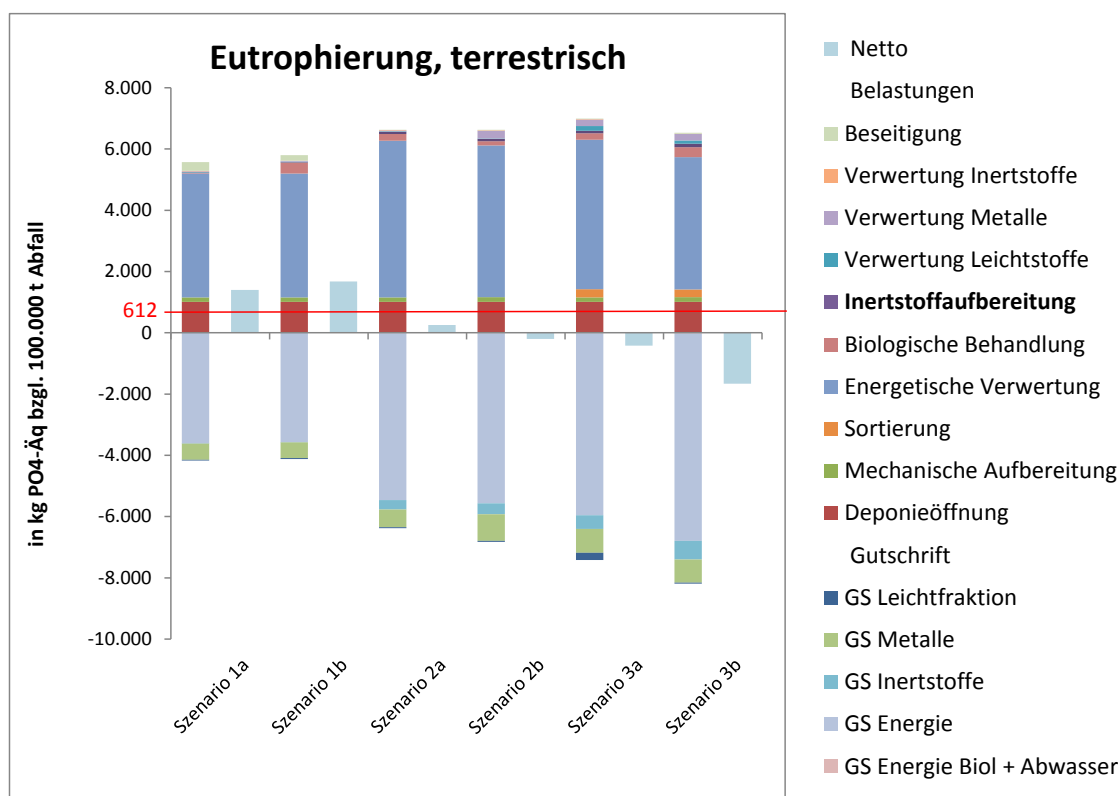


**Abbildung 9-3:** Ergebnisse zur Wirkungskategorie Versauerungspotenzial

### 9.3.3. Wirkungskategorie Eutrophierungspotenzial

Für das Eutrophierungspotenzial zeigen sich beim Referenzszenario kaum Belastungen, ähnlich wie beim Versauerungspotenzial. Die Gutschriften für die ELFM-Szenarien fallen jedoch geringer aus als bei der Wirkungskategorie Versauerung. Als Netto-Ergebnis verbleiben deshalb bei den Szenarien 1a, 1b und 2a Lasten. Die Emissionen der Dieselmotoren bei der Deponieöffnung und die bei der Verbrennung des Deponats können durch die Gutschriften aus der Verwertung des Deponats in diesen Szenarien nicht ausgeglichen werden. Die Verwertung der Metalle erzielt weiterhin im Verhältnis zum Aufwand große Gutschriften. Das Ergebnis wird tendenziell mit steigenden Verwertungsoptionen etwas besser, so dass mit Szenario 2b und 3a geringe, mit Szenario 3b aber deutlichere Nettoentlastungen verbunden sind.

Berücksichtigt man zusätzlich den Abgleich zum Referenzszenario, weisen alle Szenarien ab 2a aufwärts auch bei der Eutrophierung eine Entlastung auf.



**Abbildung 9-4:** Ergebnisse zur Wirkungskategorie Eutrophierungspotenzial

### 9.3.4. Summenparameter fossiler kumulierter Energieaufwand

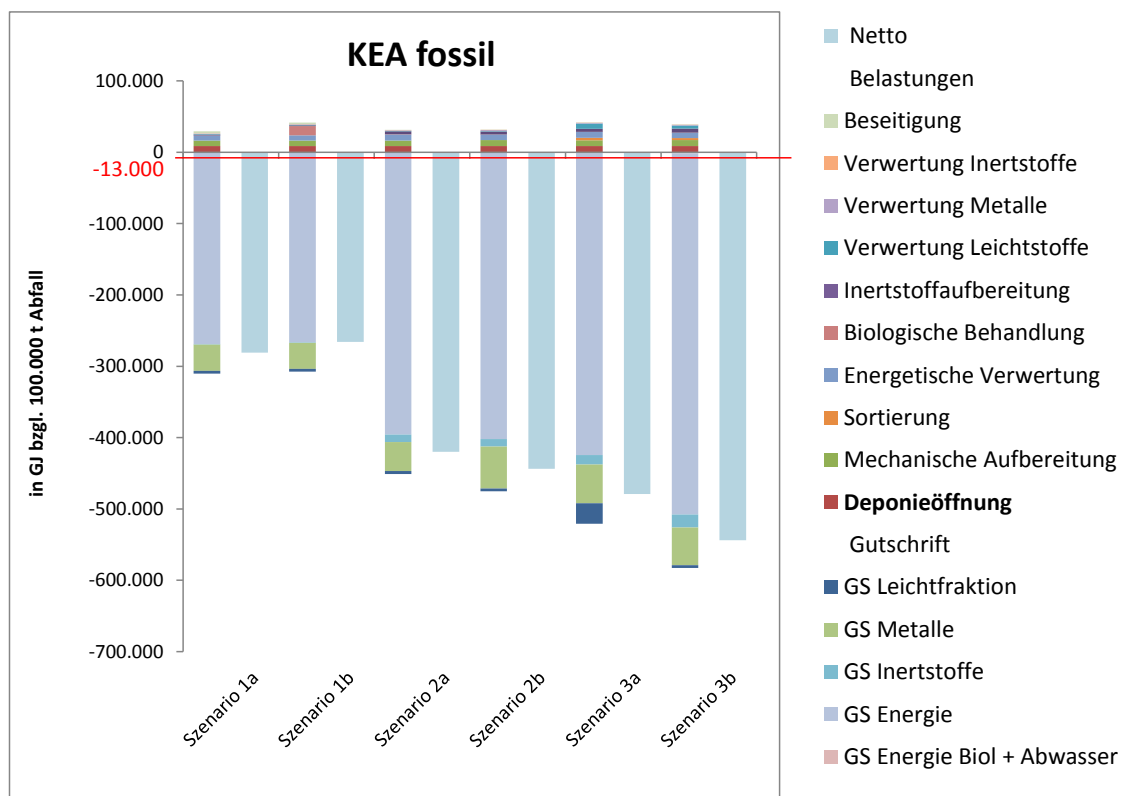
Das Referenzszenario (vgl. Abbildung 9-5) weist etwa eine ausgeglichene Bilanz auf.

Der Energieaufwand ist bei 1b, 3a und 3b etwas höher als bei den restlichen Szenarien. Im Szenario 3a trägt neben dem Aufwand für die Sortierung die stoffliche Verwertung der Leichtstoffe, bei 1b die biologische Behandlung zu einer Erhöhung bei.

Das Deponat wird über die thermische Verwertung großteils direkt in Energie umgesetzt und zeigt sich daher im Sektor Gutschrift Energie. In den Szenarien mit ambitionierter Feingutaufbereitung (ab Szenario 2a) wird eine zusätzliche heizwertreiche Fraktion gewonnen, die außerdem in Anlagen mit höheren Wirkungsgraden genutzt wird als die unaufbereitete Grobfraktion. Bei den Szenarien 3a und 3b wird zudem die Grobfraktion so aufbereitet, dass Teilströme in das EBS-HKW umgelenkt werden können. Den gleichen Effekt könnte man dadurch erreichen, dass die Fraktionen in eine MVA mit hohen Energiewirkungsgraden gebracht werden (vgl. hierzu auch Abschnitt 9.4).

Die Metallgutschriften hingegen spiegeln nicht die Energie im Deponat wider, sondern die Prozessenergie, die für die Herstellung entsprechender Primärmetalle eingesetzt werden müsste.

Der Energieaufwand, der für die Verwertung des Deponats betrieben werden muss, ist im Vergleich zu dem im Deponat verfügbaren Energiegehalt gering, so dass in allen Szenarien relevante Netto-Entlastungen entstehen. Die Netto-Entlastungen steigen mit der Aufbereitungstiefe in der Verwertung.



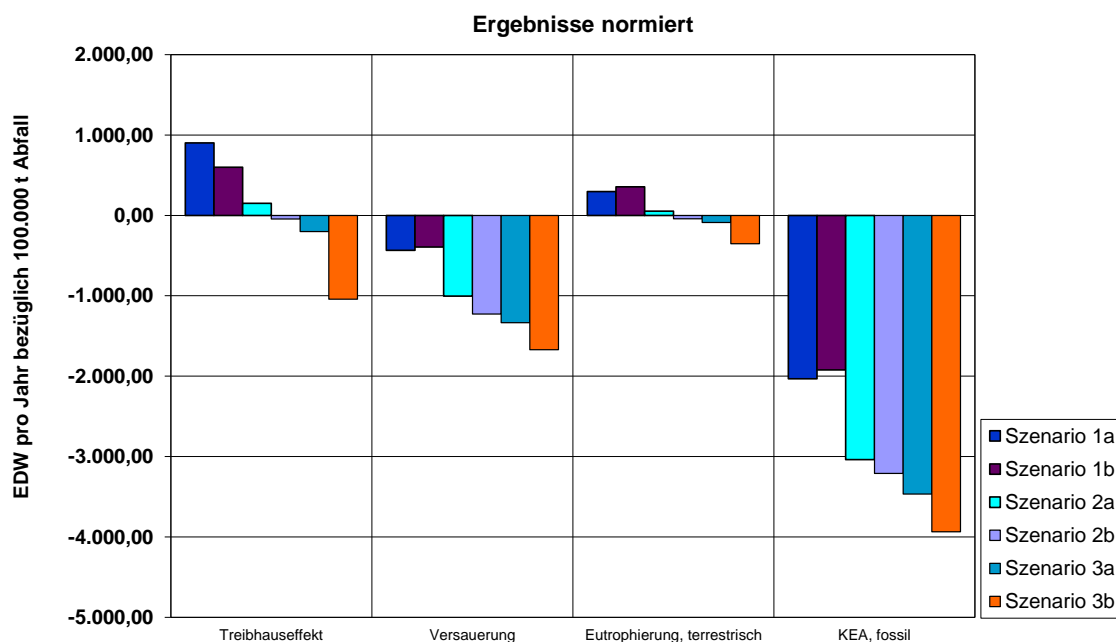
**Abbildung 9-5:** Ergebnisse zum Summenparameter kumulierter fossiler Energieaufwand

### 9.3.5. Normierung und zusammenführende Diskussion der Ergebnisse

Zur Normierung der Ergebnisse der untersuchten Wirkungskategorien und des Summenparameters werden diese auf die Lasten bezogen, die ein Einwohner in Deutschland über das ganze Jahr und die gesamte Volkswirtschaft hinweg verursacht. Damit werden die Ergebnisse für alle Kategorien in der gleichen Einheit als Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) ausgewiesen und können miteinander verglichen werden (vgl. Abbildung 9-6).

Es zeigt sich, dass die verschiedenen Wirkungsindikatoren in den untersuchten Szenarien ähnlich relevant sind. Der Summenparameter KEA fossil, der für die Schonung fossiler energetischer Ressourcen steht, zeigt eine etwas höhere Relevanz.

Eine abschließende Bewertung, ob in der Zusammenschau der einzelnen Kriterien eine Entlastung oder eine Belastung aus dem Enhanced Landfill Mining resultiert, ist so nicht ohne weiteres möglich. Deshalb muss auch die ökologische Bedeutung der einzelnen Wirkungsindikatoren berücksichtigt werden. Grundlage dazu ist die ökologische Gefahr, die von Experten-/Politiker-/Bevölkerungssicht als besonders bedrohend angesehen werden und/oder wie viel Aufwand die Gesellschaft noch zu leisten hat, um die Belastung zu senken und die Schutzziele zu erreichen (Bsp.: Rio-Ziel für Treibhauseffekt). Dem Treibhauseffekt wird die Bedeutung „sehr hoch“, dem Versauerungspotenzial „hoch“, dem terrestrischen Eutrophierungspotenzial und dem fossilen Ressourcenverbrauch jeweils „mittel“ zugewiesen.



**Abbildung 9-6:** Zusammenführung der Ergebnisse als Einwohnergleichwerte

Insgesamt ist ein ELFM bei der gegebenen Deponatzusammensetzung und den in der Basisvariante unterstellten Rahmenbedingungen sowohl mit ökologischen Vorteilen als auch mit Nachteilen verbunden.

**Es zeigt sich aber deutlich, dass sich aus ökologischer Sicht der Aufwand des ELFM lohnt.** Alle Szenarien zeigen deutliche Entlastungen bei der Ressourcenschonung - KEA, fossil - und der Versauerung. Beim Treibhauseffekt, dem Indikator mit der höchsten ökologischen Bedeutung, weisen die einfacheren Szenarien 1a und 1b Belastungen auf, 2a bzw. 2b und 3a sind etwa ausgeglichen (Be- und Entlastungen auf gleichem Niveau) mit nur geringen Belastungen bzw. Entlastungen und Szenario 3b bewirkt deutliche Entlastungen. Dasselbe Muster zeigt sich für die terrestrische Eutrophierung. Somit kann für Szenario 3b und weiterhin für die Szenarien 2b und 3a insbesondere in Verbindung mit den Ergebnissen bei der Versauerung eine ökologische Entlastung ausgewiesen werden. Berücksichtigt man den Abgleich zum Referenzszenario, weist auch Szenario 2a insgesamt eine Entlastung auf.

#### 9.4. Einflussfaktoren auf die ökologische Vorteilhaftigkeit von ELFM

Aus den Ergebnissen der Sektorenanalyse können die Stellgrößen, also die Sektoren, die den größten Beitrag zum Endergebnis liefern, festgelegt werden. Wesentliche Stellgrößen sind erfahrungsgemäß insbesondere die Menge und Qualität der Produkte bzw. der Energie, die gewonnen werden können, und die damit zu erzielenden Gutschriften sowie der Energieaufwand, der in die Aufbereitung gesteckt werden muss. Großen Einfluss auf die abschließende ökologische Bewertung haben auch die Annahmen zur Effektivität der Deponiegaserfassung bzw. die Höhe der tatsächlichen Methanemissionen im Referenzszenario.

### 9.4.1. Beschreibung der Sensitivitätsanalysen

Um den Einfluss dieser wichtigen Stellschrauben bei der ökologischen Bewertung und die damit verbundenen möglichen Schwankungsbreiten aufzuzeigen, werden folgende Sensitivitätsanalysen bilanziert:

- Variation der in der Deponie enthaltenen Wertstoffe,
- Steigerung der Wirkungsgrade bei der energetischen Verwertung in MVA und EBS-HKW,
- Variation der Effektivität der Gasfassung im Referenzszenario.

Bezüglich der Wirkungskategorien Versauerung und Eutrophierung stellt auch der Aufwand zur Deponieöffnung und Ausbaggern des Deponiematerials einen relevanten Faktor dar. Da die Aufwendungen hierfür sehr genau bestimmt werden konnten und dazu keine relevanten Alternativen gesehen werden, werden dazu keine Sensitivitäten gerechnet.

#### **Sensitivität 1: Hohe Wertstoffgehalte (WSG hoch)**

#### **Sensitivität 2: Niedrige Wertstoffgehalte (WSG niedrig)**

Auf die möglichen Erlöse (Gutschriften) aus dem Recycling und der energetischen Verwertung wirken sich insbesondere die Gehalte an Metallen, Kunststoffen sowie Holz und Textilien aus. In der Basisvariante wurden die in den Versuchen tatsächlich gefundenen Werte an diesen Wertstoffen bilanziert. Die Wertstoffgehalte können aber von Deponie zu Deponie stark schwanken. Um die Schwankungsbreite der Ergebnisse in Abhängigkeit der Wertstoffgehalte aufzuzeigen, wurden die in der Literatur verfügbaren Werte für die untere und obere Grenze der zu erwartenden Wertstoffgehalte herangezogen (vgl. hierzu Abschnitt 2.1). Folgende Wertstoffgehalte wurden der Bilanz zugrunde gelegt:

- Metalle in der Grobfraktion<sup>40</sup>: Basisvariante 2,7 %, WSG niedrig 1,5 %, WSG hoch 4,5 %
- Holz und Textilien: Basisvariante 8 %, WSG niedrig 6 %, WSG hoch 18 %
- Kunststoffe: Basisvariante 14 %, WSG niedrig 6 %, WSG hoch 20 %,

Die Sensitivität WSG hoch wirkt sich ähnlich aus, wie die Betrachtung der Wertstoffgehalte in der Standardbilanz, bei besseren Wirkungsgraden in der Aufbereitung.

#### **Sensitivität 3: Hohe Energiewirkungsgrade (EW hoch)**

Einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse der ökologischen Bewertung hat die Wahl der Anlagen, in denen die energetische Nutzung der verschiedenen Fraktionen vorgenommen wird. In den Basisvarianten werden für die MVA die durchschnittlichen Netto-Wirkungsgrade der derzeit in Deutschland betriebenen Anlagen von 10 % für Strom und 32 % Wärme angesetzt. Für das EBS-HKW wird ein Wert von 22 % Strom- und 40 % Wärmebereitstellung bilanziert. In dieser Sensitivität werden die Wirkungsgrade beider Anlagentypen auf 22 % für Strom und 50 % für Wärme gesteigert. Damit wird unterstellt, dass eine MVA mit sehr guten Wirkungsgraden die Fraktionen auf-

---

<sup>40</sup> Die im Rahmen der Feingut-Aufbereitung zurückgewonnenen Fe-Metalle wurden und werden in Abfallanalysen derzeit nicht erfasst.



nehmen kann, die für eine energetische Nutzung zur Verfügung stehen. Alternativ könnten die einzelnen Ströme auch unterschiedlichen Anlagen zugeführt werden, die im Mittel diesen Wirkungsgraden entsprechen.

#### **Sensitivität 4: hohe Gasfassungsrate (GF 90 %)**

#### **Sensitivität 5: niedrige Gasfassungsrate (GF 40 %)**

Die Höhe der Methanemissionen wirkt sich sehr stark auf das Treibhausgaspotenzial der Referenzszenarien aus.

In der Sensitivität GF hoch wird eine Gasfassung von 90 % unterstellt. Ein Wert, der nur bei erfolgter Endabdichtung in Verbindung mit einer sehr gut funktionierenden Gasfassung erreichbar ist. Wenn noch keine effektive Abdichtung errichtet wurde, können die Gasfassungsraten auch erheblich geringer sein. Für GF niedrig wird ein Wert von 40 % bilanziert.

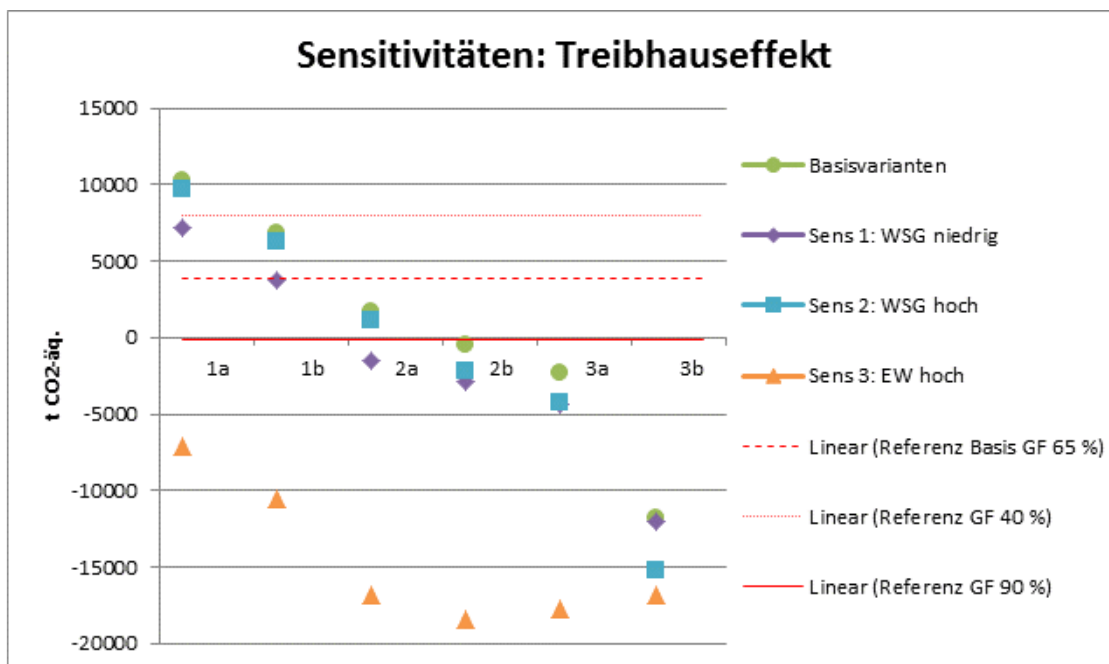
In der Basisvariante wurde für das Referenzszenario angenommen, dass eine Gasfassungsrate von 65 % erreicht werden kann. Dieser Wert stellt einen mittleren Wert zwischen GF hoch und GF niedrig dar und keinen Praxiswert der untersuchten Deponie, da hierfür kein eindeutiger Wert vorliegt.

Es ist zu beachten, dass über den gesamten „Lebensweg“ der Deponie, aufgrund höherer Gasemissionen während der Einbauphase, geringere Gasfassungsraten zu beobachten sind, die aber für die hier untersuchte Fragestellung nicht von Bedeutung sind.

#### **9.4.2. Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen**

In den folgenden Grafiken (Abbildungen 9-7 bis 9-10) werden die Nettoergebnisse der untersuchten Sensitivitäten aller Szenarien einschließlich der Referenzszenarien dargestellt.

Der Einfluss der unterschiedlichen Gasfassungsraten bei den Sensitivitäten zum Referenzszenario (in den folgenden Abbildungen dargestellt als rote Linien) wirkt sich erwartungsgemäß nur beim Treibhauseffekt in relevantem Umfang aus. Für Deponien, die noch nicht endabgedichtet sind und die Gasfassungsraten um 40 % aufweisen, sind auch einfache ELFM-Szenarien ökologisch vorteilhafter als das Belassen der Abfälle bei den gegebenen Deponiegasemissionen.



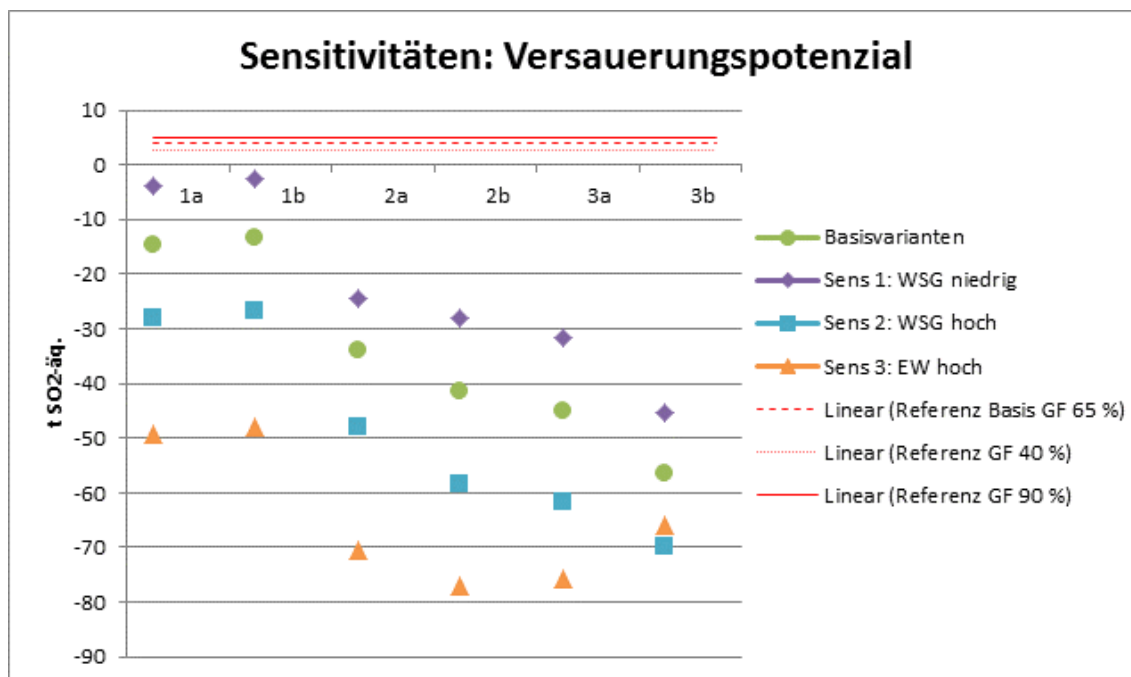
**Abbildung 9-7:** Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen zum Treibhauseffekt

Der Einfluss der Variationen in den Wertstoffgehalten ist dagegen zumindest für die Wirkungskategorie etwas geringer und hängt stark davon ab, ob eher ein einfaches oder ein ambitioniertes ELFM-Szenario umgesetzt wird. Bei den einfacheren Verfahren reduzieren sich die Treibhausgasemissionen bei geringeren Gehalten an Kunststoffen, da diese in der energetischen Verwertung netto zu Belastungen führen. Bei allen anderen Indikatoren steigen die Lasten an, weil der entgangene Nutzen höher ist als die direkten Emissionen in der MVA.

Bei allen anderen Wirkungskategorien und bei KEA ist der Einfluss des Wertstoffgehalts in der Deponie größer.

Weist die Deponie hohe Methanemission und geringe Kunststoffgehalte auf, könnte selbst im Szenario 1a und bei den durchschnittlichen Wirkungsgraden der energetischen Nutzung in der Basisvariante eine etwa ausgeglichene ökologische Bilanz erreicht werden.

Je ambitionierter das ELFM-Szenario bezüglich der Gewinnung von Wertstoffen für ein hochwertiges Recycling ist, umso mehr wirkt sich ein höherer Wertstoffgehalt in der Deponie positiv auf das Ergebnis der ökologischen Bewertung aus.

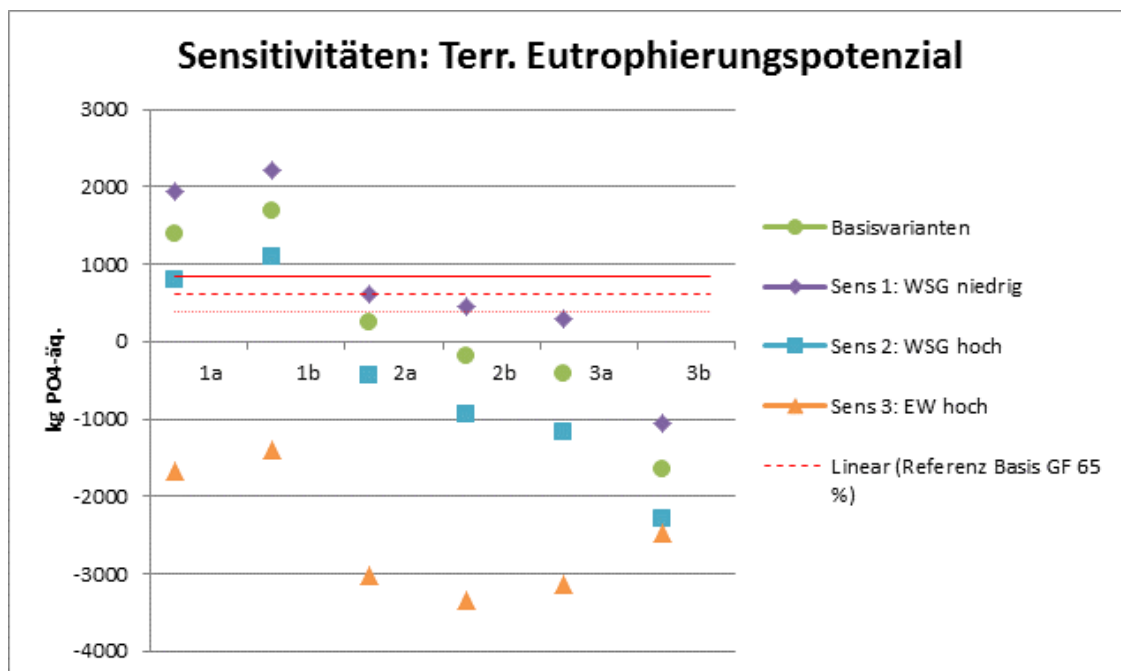


**Abbildung 9-8:** Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen zum Versauerungspotenzial

Besonders positiv wirkt es sich aus, wenn für die energetische Nutzung ausschließlich Anlagen mit hohem Wirkungsgrad genutzt werden können, da diese in allen Szenarien mit Abstand die größten Stoffströme zur Verwertung darstellen. Gelingt es, die gering aufbereiteten Stoffströme der Szenarien 1a und 1b in eine entsprechend effektive MVA zu bringen, tragen diese Szenarien bei allen Umweltkriterien zur Entlastung bei und sind deutlich besser zu bewerten als die Referenzszenarien.

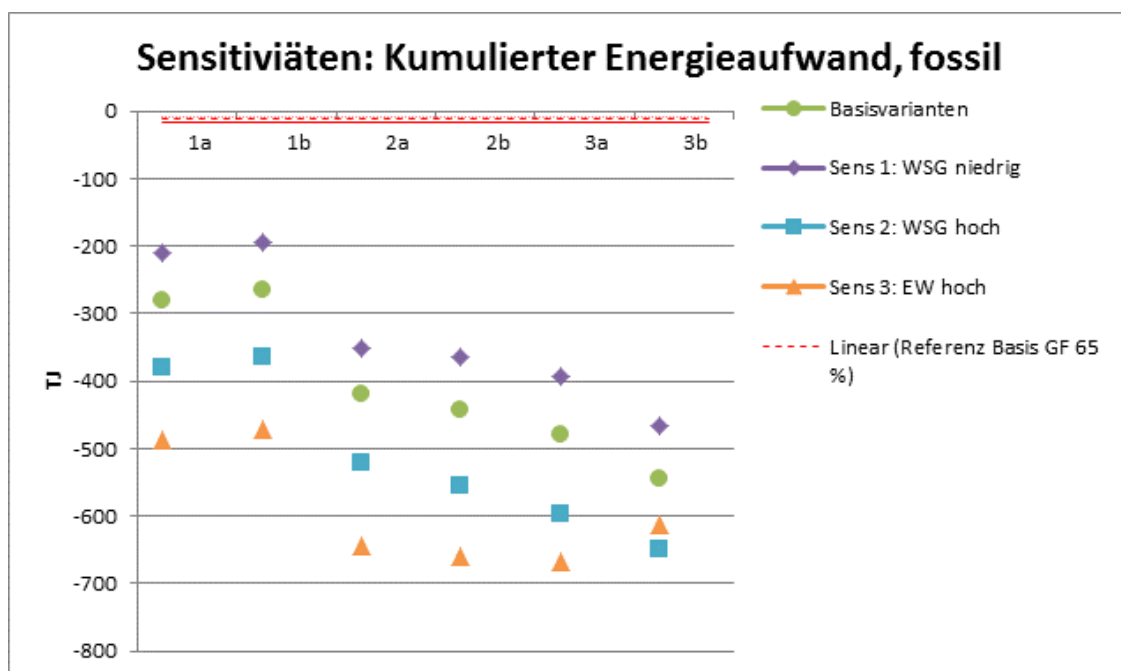
Die intensive Feingutaufbereitung bringt auch für diesen Fall eine relevante Verbesserung gegenüber den einfachen Verfahren der Szenarien 1a und 1b. Da im Szenario 3b bereits in der Basisvariante eine intensive Stoffstromtrennung erfolgt, die den größten Teil des heizwertreichen Materials als EBS zur Verfügung stellt, ist hier der Vorteil nicht mehr so erheblich. Der höhere Aufbereitungsaufwand der Szenarien 3a und 3b kann bei dieser Sensitivität durch die geringeren Mehrnutzen nicht mehr aufgefangen werden. Steht eine sehr effektive MVA zur Verfügung, erzielt das Szenario 2b das beste Ergebnis, bei dem der Schwerpunkt des Recyclings auf die Metalle abzielt.

Die effektive Bereitstellung von Metallen, insbesondere auch der Nichteisenmetalle lohnt sich im direkten Vergleich zwischen den Szenarien 2a und 2b unter allen betrachteten Rahmenbedingungen.



**Abbildung 9-9:** Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen zum terrestrischen Eutrophierungspotenzial

In der Sensitivität 3, EW hoch, weisen alle Szenarien, z. T. erhebliche Vorteile gegenüber dem Verbleib des Deponats auf. Dies gilt unabhängig von der Qualität der Abdeckung auch dann, wenn keine relevanten Deponiegasemissionen mehr zu Buche schlagen. In allen anderen Sensitivitäten und in der Basisvariante erreicht Szenario 3b die besten Ergebnisse. Auch hier liegt das insbesondere daran, dass die höchsten Anteile der behandelten Materialien in eine effektive energetische Nutzung gebracht werden.



**Abbildung 9-10:** Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen zum fossilen kumulierten Energieaufwand

## 9.5. Erkenntnisse der ökologischen Bewertung

Die Analysen zur ökologischen Bewertung zeigen deutlich, dass die Ergebnisse insbesondere davon abhängen, dass für die Verwertung der heizwertreichen Fraktionen aus aufbereitetem Deponat Anlagen genutzt werden können, die einen hohen Wirkungsgrad aufweisen. Stehen hierfür energetisch effiziente Müllverbrennungsanlagen zur Verfügung, muss der Aufwand für die Aufbereitung der Grobfraktion nicht so hoch sein. Andernfalls sollte durch eine intensivere Aufbereitung ein EBS hergestellt werden, der dann in energetisch effektivere Anlagen verbracht werden kann, die zum Teil höhere Anforderungen an die Brennstoffe stellen.

Insbesondere angesichts der Entwicklungen auf dem Energiemarkt wird es wichtig, neben der Auswahl von Anlagen mit hohen energetischen Wirkungsgraden, auch darauf hinzuwirken, dass Brennstoffe generiert werden können, die flexibel dort eingesetzt werden können, wo sie insbesondere fossile Primärbrennstoffe ersetzen.

Wesentlichen Einfluss auf die ökologische Bewertung eines ELFM-Szenarios hat die Aufbereitung des Feinguts - nicht nur, dass hierdurch erst ein kompletter Rückbau ermöglicht wird, durch den eine Neunutzung der Deponiefläche möglich wird, sondern weil hierdurch auch relevante Verwertungsmengen an Metallen, Glas und EBS bereitgestellt werden können.

Die einfacheren Konzepte bestehen den ökologischen Vergleich mit den Referenzszenarien nur, wenn die Deponie noch hohe Methanemissionen aufweist. Daraus darf nicht der Umkehrschluss gezogen werden, dass das Warten auf Rahmenbedingungen, die Enhanced Landfill Mining wirtschaftlich attraktiver machen, zur Hinauszögerung einer Endabdeckung führen dürften. Vielmehr muss in solchen Fällen schnell geprüft und entschieden werden, welche der beiden Varianten im konkreten Einzelfall die Maßnahme der Wahl ist. Aus ökologischer Sicht kann in so einem Fall durchaus der Zeitfaktor, bis wann die Methanemissionen unterbunden werden können, den Hauptauschlag geben.

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

## 10. Entscheidungsunterstützung und Handlungsempfehlungen

*Michael Krüger, Bernd Becker, Günter Dehoust, Joachim Reinhardt, Florian Knappe, Anna Breitenstein, Karsten Kieckhäfer, Thomas S. Spengler*

Das folgende Kapitel soll bei der Entscheidungsfindung unterstützen. Hierzu werden zu prüfende Aspekte aufgezeigt und Handlungsempfehlungen gegeben.

In Abschnitt 10.1 werden zunächst die grundlegenden Aspekte, die im Rahmen der Entscheidungsfindung „ELFM: ja oder nein“ seitens der Deponiebetreiber geklärt werden müssen, zusammengefasst. Abschnitt 10.2 befasst sich mit den Empfehlungen an die Politik, um die Prüfung „ELFM: ja oder nein“ in bereits bestehende Pflichten des Deponiebetreibers als Alternative zur Stilllegung mit der anschließenden Nachsorge mit aufzunehmen. In Abschnitt 10.3 und 10.4 wird dann die ökonomische und ökologische Vorteilhaftigkeit der Handlungsalternative näher herausgearbeitet. Ein konkretes Beispiel zur Entscheidungsfindung „ELFM: ja oder nein“ wird in Abschnitt 10.5 thematisiert. Ist die Vorteilhaftigkeit für ein ELFM belegt, ist die Detailplanung vorzunehmen. Hierzu fasst Abschnitt 10.6 Handlungsempfehlungen zusammen.

### 10.1. Entscheidungsfindung seitens der Deponiebetreiber

Damit ein Deponiebetreiber<sup>41</sup> für sich entscheiden kann, ob ein Deponierückbau bzw. ELFM für seinen Standort eine vorteilhafte Alternative gegenüber der bereits jetzt gesetzlich geregelten „Deponiestilllegung mit der Nachsorgeverpflichtung“ darstellt, ist der rechtliche Status der Deponie zu ermitteln. Es ist zu prüfen, ob eine Gefährdung durch die Deponie über die zu erwartenden Nachsorgeverpflichtungen vorliegt und es sind die relevanten Einflussgrößen auf die Schutzgüter und Wirtschaftlichkeit festzustellen. Hierbei handelt es sich um Betrachtungen für den jeweiligen Einzelfall, die nachfolgend näher erläutert werden.

#### Rechtlicher Status der Deponie

Zur Prüfung der Voraussetzungen ist der rechtliche Leitfaden mit den zulassungsrechtlichen Anforderungen entwickelt worden (Anhang 1). Hier ist ebenfalls die Nutzung der gebildeten Rückstellungen zur Finanzierung eines ELFM beschrieben. Es müssen insbesondere folgende Fragen geklärt werden:

- Befindet sich die Deponie im Rechtsregime des Abfallrechts (KrWG) oder im Rechtsregime des Bodenschutzgesetzes (Altlast, Altablagerung)?
- Befindet sich die Deponie in der Betriebs-, Stilllegungs- oder Nachsorgephase?

Für den Fall, dass das Abfallrecht gilt, steht einem ELFM grundsätzlich aus rechtlicher Sicht nichts entgegen. Nach Bodenschutzrecht ist ein ELFM nur möglich, wenn von der Deponie eine Gefährdung ausgeht (Altlastensanierung).

---

<sup>41</sup> Deponiebetreiber ist in der Regel der öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger, der für die Vermeidung, Vorbereitung zur Wiederverwertung, das Recycling, die sonstige Verwertung (insbesondere energetische), Verfüllung und Beseitigung von Abfällen zuständig ist.

## **Gefährdung durch die Deponie**

Ist das Wohl der Allgemeinheit gefährdet bzw. sind die Schutzgüter wie Boden, Wasser und Luft betroffen, so besteht sofortiger Handlungsbedarf. Es ist das Ausmaß der Gefährdung festzustellen und die Sanierungsschritte sind einzuleiten.

Die Sanierungsschritte sind gegeneinander abzuwägen und zwar sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Sicht. Dies können Maßnahmen der Gefahreneindämmung und Minderung der Schadstoffeinträge sein, wie bspw. das Umschließen des Deponiekörpers mit einer vertikalen Dichtwand, mit hydraulischen Lösungen, mit Aufbereitung der gefassten Wasserströme oder auch die Umlagerung von Deponat aus einzelnen problematischen Deponieabschnitten. Eine der Handlungsalternativen ist hierbei der Rückbau des Deponiekörpers, dann möglichst in Form eines ELFM.

Die Abwägung muss nicht nur die eigentliche Maßnahme, sondern auch die Entsorgung des anfallenden Deponats sowie der durch die Maßnahme erreichten Erfolge (Beseitigung der Gefährdungssituation) umfassen. Die Beseitigung der Gefährdung ist mittels Gutachten nachzuweisen.

## **Wirtschaftlichkeit und Umweltwirkungen**

Durch die Beantwortung der nachfolgenden Fragestellungen können in einem ersten Schritt die ökonomischen und ökologischen Konsequenzen eines ELFM abgeschätzt und mit denen der Deponienachsorge verglichen werden:

- Besteht Akzeptanz seitens der Bevölkerung für ein ELFM?
- In welcher Höhe fallen Nachsorgeverpflichtungen für die Deponie an?
  - Die Nachsorgeverpflichtung ergibt sich aus der gesetzlichen Verpflichtung § 40 KrWG und der Deponieverordnung §§ 10 und 11.
  - In der Regel wird der zu erbringende Rückstellungsbetrag über ein Rückstellungsgutachten für die Deponie abgesichert. Das Rückstellungsgutachten unterliegt einer regelmäßigen Fortschreibung (ca. alle 5 Jahre).
  - Die Nachsorgephase ist zeitlich nicht begrenzt und definiert sich letztlich über den Abbau des Gefährdungspotenzials der Deponie.
  - Der Betreiber hat bis zum Ende der Nachsorgephase die Kosten für die Rekultivierung der Deponie und für die sonstigen Vorkehrungen, einschließlich der Überwachungs- und Kontrollmaßnahmen, zu tragen.
  - Der Abschluss der Nachsorge wird durch die zuständige Behörde auf Antrag des Deponiebetreibers festgestellt.
  - Die Prüfung eines ELFM sollte daher in der wiederkehrenden Überprüfung des Rückstellungsbedarfs für die Nachsorgeverpflichtung mit verankert werden. Dies soll auf der Basis der ökologischen als auch ökonomischen Betrachtung erfolgen.
- Ist die Werthaltigkeit der Rohstofflagerstätte Deponiekörper bestimmt (z. B. heizwertreiche Fraktion, mineralische Feinfraktion, Metalle)?
- Dient ELFM der Volumengewinnung oder der Flächengewinnung und besteht ein Markt dafür?
- Können durch das ELFM Investitionen für eine neu zu bauende Deponie vermieden werden?

- Sind auf der Deponie Anlagen für den Rückbau, die Vorkonditionierung (z. B. MBA) und die energetische bzw. stoffliche Verwertung vorhanden und können diese für ein ELFM genutzt werden?
- Befinden sich im Umkreis der Deponie Anlagen mit Leerkapazitäten, die durch ein ELFM besser ausgelastet werden könnten? Können hierüber günstigere Behandlungspreise erzielt werden?
- Wird durch ELFM die Umweltsituation im Bereich der Deponie verbessert?

Das Ziel der Beantwortung dieser Fragestellungen ist der Nachweis, ob ein ELFM wegen der ökologischen Vorteile auch aus ökonomischer Sicht unter Beachtung der jeweiligen Rahmenbedingungen zu rechtfertigen ist. Hierbei sollte die Politik und die Öffentlichkeit frühzeitig in die Entscheidungsfindung einbezogen werden.

## 10.2. Empfehlungen an die Politik

Die Empfehlungen an die Politik basieren auf dem rechtlichen Leitfaden (s. Anlage) und zielen auf die Ergänzung oder Erweiterung der rechtlichen Rahmenbedingungen ab. Der ökologische Gedanke eines ELFM sollte unter den Prämissen Umweltschutz und Ressourcenschonung als Alternative zur Nachsorgeverpflichtung in das KrWG und DepV verankert werden.

Folgende wesentliche Vorschläge für Gesetzesänderungen sind im rechtlichen Leitfaden des MKUNLV (s. Kapitel 11: Anhang 1) enthalten:

- Kreislaufwirtschaftsgesetz
  - § 40 KrWG Stilllegung (Aufnahme ELFM)
  - § 35 Abs. 2 KrWG Planfeststellungsverfahren z. B. ergänzen:
    - „Die Errichtung und der Betrieb von Deponien, der Deponierückbau sowie die wesentliche Änderung einer solchen Anlage oder ihres Betriebes bedürfen der Planfeststellung durch die zuständige Behörde.“
  - § 35 Abs. 3 KrWG Plangenehmigungsverfahren
    - Satz 1, Nr. 3:
      - Ergänzung des Deponierückbaus (Erprobung neuer Verfahren)*
    - Satz 2: *ggf. Ergänzung der Ressourcenrückgewinnung bzw. des Ressourcenschutzes als weiterer Zweck zur Durchführung eines Plangenehmigungsverfahrens (neben dem Zweck wesentlicher Verbesserung für die Schutzgüter).*
- Deponieverordnung
  - § 1 Abs. 1 Nr. 1 (Anwendungsbereich erweitern)
    - „Diese Verordnung gilt für 1. die Errichtung, den Betrieb, die Stilllegung, Nachsorge und Rückbau von Deponien, ...“
  - § 2 DepV (Begriffsbestimmungen ergänzen)
    - „Deponierückbau:  
Abgrabung der auf einer Deponie abgelagerten Abfälle, entweder der gesamten Deponie oder einzelner Deponieabschnitte“



- einen neuen § 11 a DepV „Deponierückbau“(einfügen)

*Zweck des Deponierückbaus ist die Ressourcenrückgewinnung oder die Verbesserung der Schutzgüter.*

In Hinblick auf Umweltschutz und Ressourcenschonung können u. a. folgende Nutzen abgeleitet werden:

- Substitution primärer Rohstoffe durch die Verwertung der beim Rückbau des Deponiekörpers gewonnenen Materialien und damit Verringerung des mit dem Rohstoffabbau verbundenen Eingriffs und dessen Auswirkungen auf die Schutzgüter, wie z. B. Natur- und Landschaftshaushalt, Gewässer und Boden.
- Weniger Inanspruchnahme von neuen Flächen für Deponien.

Die Prüfung „ELFM: ja oder nein“ wird dann positiv entschieden, wenn die Umsetzung ökologisch und ökonomisch vorteilhaft ist und wenn die Öffentlichkeit gemeinsam mit der Politik dem jeweiligen Vorhaben zustimmt.

Darüber hinaus sollte darüber nachgedacht werden, den Absatz der aus dem Deponiekörper gewonnenen Sekundärrohstoffe gezielt zu fördern. Dies kann mit der Notwendigkeit eines Nachweises verbunden werden, dass die Umsetzung der Maßnahme und die Rückführung der Massen in den Wirtschaftskreislauf ökologisch (besonders) vorteilhaft sind (z. B. auf der Basis von Ökobilanzen). Die Förderung sollte insbesondere dann erfolgen, wenn der Deponierückbau so erfolgt, dass keine weiteren Flächen für neue Deponien in Anspruch genommen werden.

### **10.3. Vorgehen zur Ermittlung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit eines ELFM**

Wie in Kapitel 8 beschrieben, ist die Wirtschaftlichkeit eines ELFM im Einzelfall zu prüfen. Anschließend ist zur Akzeptanzbildung ein Abwägen zwischen ökonomischen und ökologischen Konsequenzen des ELFM empfehlenswert. Ist die ökonomische Vorteilhaftigkeit eines ELFM nicht gegeben, die ökologische Vorteilhaftigkeit jedoch erwiesen, ist zu klären, ob die zu erwartenden Mehrkosten angesichts des ökologischen Vorteils von der Öffentlichkeit und der Politik akzeptiert werden. Um die Mehrkosten dabei so gering wie möglich zu halten, können unterschiedliche Maßnahmen ergriffen werden. Diese beziehen sich einerseits auf den wirtschaftlichen Nutzen, der durch ein ELFM erzielt werden kann, wie z. B. eingesparte Deponienachsorgekosten, Erlöse für freiwerdende Flächen bzw. Deponievolumen und Erlöse für rückgewonnene Wertstoffe. Andererseits sind Maßnahmen zu ergreifen, um Investitionen in Anlagen und Maschinen, Prozesskosten sowie Kosten für die Entsorgung von Reststoffen und die Weitergabe von Zwischenprodukten zu minimieren.

Es wird empfohlen, im Rahmen der wiederkehrenden Anpassungen des Nachsorgebedarfs die Alternative des ELFM im Rahmen einer Grobbetrachtung mit zu berücksichtigen. Folgende Schritte sind für eine Entscheidungsfindung vorzunehmen:

#### **Ermittlung möglicher Erlöse für freiwerdende Flächen bzw. Deponievolumen**

Ist nach einem ELFM die Rückgewinnung der Fläche vorgesehen, sind die Erlöse durch den Verkauf der Fläche zu bestimmen. Hierzu ist der Grundstückswert nach vollständigem Rückbau und Schadstoffentfernung abzuschätzen.

Ist nach einem ELFM die Nutzung des gewonnenen Volumens zur erneuten Deponierung vorgesehen, ist der Wert des Volumens zu bestimmen. Dieser hängt einerseits von der Art des zukünftig einzulagernden Abfalls (z. B. MBA-Output; hierzu die Ablagegenehmigung prüfen) ab. Andererseits können nicht getätigte Investitionen zur Schaffung neuer Deponieabschnitte dem Volumenwert gutgeschrieben werden.

### **Ermittlung der möglichen Erlöse für rückgewonnene Wertstoffe**

Es ist zu prüfen, welches Wertstoffpotenzial in der eigenen Deponie zu erwarten ist (vgl. Historische Erkundung und Probebohrung in Kapitel 2). Mögliche Stoffgruppen und Verwertungswege im Rahmen eines ELFM sind in Kapitel 2 aufgelistet. Mögliche Preise für die verschiedenen Fraktionen sind abzuschätzen. In Tabelle A 1-2 im Anhang 2 sind Preise für die Fraktionen aufgelistet, die durch Aufbereitung des Deponats der „Pohlschen Heide“ erzielt wurden. Es empfiehlt sich ein Vergleich der selbst geschätzten Preise mit denen in der genannten Tabelle sowie mit aktuellen Marktpreisen.

Die günstigsten Entsorgungswege für die verschiedenen Stoffgruppen sind zu identifizieren. Grundsätzlich gilt: Eine stoffliche Verwertung ist einer energetischen Verwertung vorzuziehen. Ist die Abgabe bzw. der Verkauf von Sekundärrohstoffen wie Metalle, Kunststoffe, EBS, SBS, Glas, Steine etc. kostengünstiger als die energetische Verwertung der heizwertreichen Fraktionen, ist die Rückgewinnung dieser anzustreben. Der Rückgewinnungsaufwand für die verschiedenen Fraktionen ist jedoch im Rahmen dieser Kalkulation zu berücksichtigen.

### **Ermittlung der Aufwendungen für die Beseitigung anfallender Reststoffe**

Je nach ELFM-Konzept fallen unterschiedliche Massenströme und damit Kosten für die Abfallverbringung an. Diese sind zu ermitteln. Es gilt: Je umfangreicher die Wertstoffrückgewinnung ist, desto weniger Reststoffe müssen energetisch verwertet bzw. beseitigt werden. Sobald die Beseitigung der Restfraktionen nicht in eigenen Anlagen erfolgen kann, ist der Aufwand zur Beseitigung dieser Fraktionen in anderen Anlagen zu bestimmen. Hierbei sind Logistikkosten zu berücksichtigen.

### **Ermittlung der Kosten für den Rückbau, die Vorkonditionierung und die stoffstromspezifische Behandlung des Deponats**

Es ist zu prüfen, ob der Rückbau, die Vorkonditionierung sowie die stoffstromspezifischen Behandlungsschritte von externen Dienstleistern oder in Eigenregie durchgeführt werden sollen.

Hierzu ist zu klären, ob eigene geeignete Anlagen zur Verfügung stehen (vgl. Eignungskriterien der Kapitel 3 - 6) sowie ausreichende Kapazitäten vorhanden sind. Weiterhin ist zu prüfen, ob Investitionen in neue Anlagen am Standort sinnvoll sind. Dabei sind, falls erforderlich, Folgenutzungskonzepte von Maschinen und Anlagen zu berücksichtigen. Im Falle der Beauftragung externer Dienstleister sind die Kosten, die durch die Aufbereitung in fremden Anlagen anfallen, zu ermitteln. Die verschiedenen Alternativen sind unter Berücksichtigung der Logistikkosten zu vergleichen.

Sind ähnliche Rückbauvorhaben in der Region bekannt, ist zu prüfen, ob die Möglichkeit eines Zusammenschlusses besteht, um Investitionen in neue Anlagen gemeinsam zu tätigen und hierdurch Größendegressionseffekte sowie eine Risikoteilung zu realisieren.

## **Ermittlung eines Zeitplans**

Ist die Entscheidung für eine ELFM getroffen, ist ein Zeitplan aufzustellen. Der Rückbau selbst sollte möglichst schnell durchgeführt werden, um die Kosten für Arbeitsschutz-, Emissions- und Umweltüberwachungsmessungen und die Sickerwasserneubildung und -behandlung während der Rückbauphase möglichst gering zu halten. Ggf. müssen Zwischenlagerflächen und Flächen für die weitere Aufbereitung geschaffen werden.

### **10.4. Vorgehen zur Ermittlung der ökologischen Vorteilhaftigkeit eines ELFM**

Wie in Kapitel 9 gezeigt, ist die ökologische Vorteilhaftigkeit eines ELFM im Einzelfall zu überprüfen. Entsprechend ist für die Akzeptanzbildung insbesondere ein Abwägen zwischen ökologischen und ökonomischen Konsequenzen des ELFM notwendig. Hierbei ist zu klären, ob das ELFM gegenüber der Stilllegung und Nachsorge ökologische Vorteile erzielt. Dies ist der Fall, je höher die zu erwartenden Emissionen in der Stilllegungs- und Nachsorgephase der Deponie insbesondere durch Methanfreisetzungen und Belastungen des Grundwassers, je weniger Emissionen durch das ELFM selbst verursacht werden und je mehr werthaltige Materialien oder Energie durch das ELFM nach Abzug des Eigenbedarfs bereitgestellt werden können, umso eher wird das ELFM gegenüber der Nachsorge ökologische Vorteile erzielen.

Die Bilanz der Aufwendungen (Lasten) und Erfolge (Substitutionserfolge; Gutschriften) des ELFM kann mit einer Ökobilanz-Software (z. B. Umberto®) durchgeführt werden. Im Verlauf der Planung können zunächst grobe Schätzungen zugrunde gelegt werden, die nach und nach durch konkrete, vor Ort erhobene Daten ersetzt werden.

#### **Ermittlung der Auswirkungen auf die Schutzgüter für die Nachsorgephase der Deponie**

Die möglichen Auswirkungen auf die Schutzgüter sowohl für die Stilllegung als auch die Nachsorge der Deponie sind zu ermitteln. Für die Deponiestilllegungs- und -nachsorgephase sind vor allem die Deponiegasemissionen (Methan) sowie die Sickerwasseremissionen relevant.

Wichtig ist, dass eine Entscheidung bei hohen, unkontrollierten Methanemissionen aus der Deponie schnell gefällt werden muss, entweder für umfassende Sanierungsmaßnahmen des Deponiekörpers oder zu einem ELFM.

#### **Ermittlung der Aufwendungen bei Durchführung des ELFM**

Die Aufwendungen an Energie, Treibstoffen und Betriebsmitteln für die einzelnen Teilschritte des ELFM sowie die mit dem Eingriff in den Deponiekörper verbundenen Emissionen sind zu ermitteln und die damit verbundenen Umweltlasten zu bilanzieren. Hierzu müssen die Lage (Transporte) und die Betriebsdaten (Energieverbrauch, Wirkungsgrad etc.) der Anlagen zur Konditionierung, Aufbereitung und Behandlung der einzelnen Fraktionen des Deponats erhoben werden. Bei der Planung und konkreten Konzeption des ELFM muss darauf geachtet werden, dass Verfahren und Techniken zum Einsatz kommen, die die Umweltlasten mindern.

Sollte der Deponiekörper ein hohes Emissionspotenzial besitzen, sind vor dem Öffnen des Deponiekörpers zwingend entsprechende emissionsmindernde Maßnahmen durchzuführen (siehe Kapitel 3).

## Ermittlung von Gutschriften durch bereitgestellte Energie und Wertstoffe

Die Gutschriften für die Massenströme, die stofflich verwertet werden können, sowie für die Massenströme, die für die energetische Verwertung bestimmt sind, sind zu ermitteln (zur Ermittlung vgl. Kapitel 9).

Aus ökologischer Sicht ist es von zentraler Bedeutung, das wertgebende Potenzial des rückgebauten Deponats möglichst vollständig und umfassend zu nutzen. Die stoffliche Verwertung ist gemäß KrWG der energetischen vorzuziehen. Ist dies nicht möglich, sind die Massen über eine Anlage energetisch zu verwerten, die eine hohe Effizienz aufweist, d. h. den Energieinhalt des Abfalls mit hohen Wirkungsgraden in elektrische Energie und Nutzwärme umwandelt.

### 10.5. Beispiel der Entscheidungsfindung

Die für ein ELFM entwickelten Handlungsstrategien und deren Bewertung basieren auf den spezifischen Verhältnissen der Deponie „Pohlsche Heide“, d. h. auch auf der Abfallzusammensetzung und -charakteristik. Die durchgeführten Sensitivitätsanalysen sollen das Ableiten allgemeingültiger Erkenntnisse ermöglichen. Die Bandbreite der Sensitivitäten ist auf Basis von Literaturwerten entwickelt worden.

Zur konkreten Entscheidungsfindung ist die Einordnung der eigenen Deponie anhand der Ergebnisse der ökologischen und ökonomischen Sensitivitätsanalysen vorzunehmen. Hierüber soll ersichtlich werden, welche ELFM-Szenarien aus ökologischer bzw. ökonomischer Sicht für den jeweiligen Fall vorteilhaft sind. Die Basisvariante stellt die exemplarische Einordnung der Deponie „Pohlsche Heide“ dar.

Die Prüfung der Vorteilhaftigkeit soll mit der Ökologie beginnen, um zunächst ökologisch vorteilhafte ELFM-Szenarien zu identifizieren, die anschließend ökonomisch eingeordnet werden können. Abschließend sollte verbal-argumentativ abgewogen werden, welche Alternative insgesamt für die jeweils betrachtete Deponie am besten ist. Das Vorgehen wird exemplarisch für die „Pohlsche Heide“ erläutert.

Eine erste grobe **ökologische Einordnung** kann anhand der Umweltwirkungskategorie Treibhauseffekt erfolgen.

Zunächst wird über die Gasfassungsrate (GF) und das Alter der Deponie festgelegt, auf welcher der roten Linien der Weiterbetrieb der Deponie anzusiedeln wäre. Wenn die Deponie geschlossen ist und mit einer funktionierenden Deponiegasfassung ausgerüstet ist, kann von einer Fassungsrate von zumindest 65 % ausgegangen werden, weniger bei nicht geschlossenen Deponien. Das dabei zugrunde gelegte Deponiegaspotenzial gilt für eine Deponie, die Anfang der 90er Jahre erstmals mit Hausmüll verfüllt wurde. Wenn die zu betrachtende Deponie jüngeren Alters ist, kann daher ein höherer Wert entsprechend geringerer Gasfassungsrate angesetzt werden. Bei höherem Alter gilt das Umgekehrte.

Die nächste für die Beurteilung wichtige Kenngröße ist die Zusammensetzung des Deponats bzw. die Bestimmung des wertgebenden Anteils (Wertstoffgehalt WSG). Im Diagramm sind die Ergebnisse zu folgenden Wertstoffgehalten aufgeführt:

- WSG niedrig: Metalle 1,5 %; Holz und Textilien 6 %; Kunststoffe 6 %,
- Basisvarianten („Pohlsche Heide“): Metalle 2,7 %; Holz und Textilien 8 %; Kunststoffe 14 %,

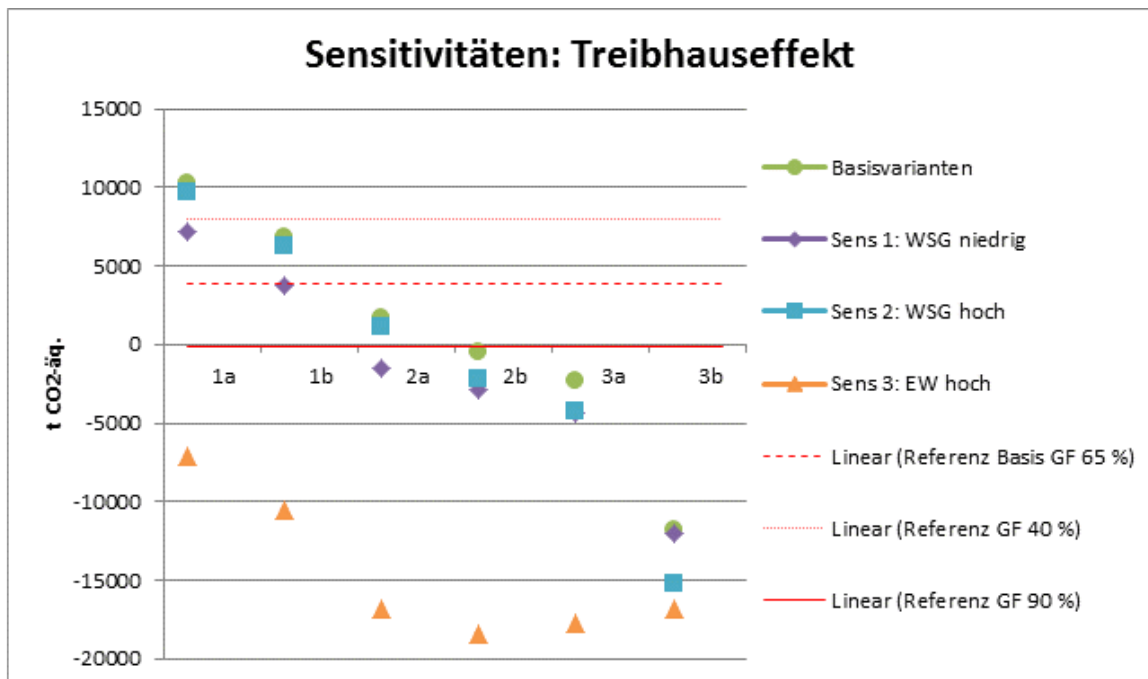
- WSG hoch: Metalle 4,5 %; Holz und Textilien 18 %; Kunststoffe 20 %.

Wenn die Kunststoffgehalte im Bereich WSG hoch liegen, die Metalle und die erneuerbaren Energien im Bereich WSG niedrig, so ist der Gesamtgehalt eher bei WSG hoch anzusiedeln und im umgekehrten Fall bei WSG niedrig, weil die Kunststoffe den Gesamteinfluss dominieren. Die hier aufgeführte Abfallzusammensetzung beeinflusst das stofflich verwertbare Potenzial (i.W. Metalle) sowie die Brennstoffeigenschaften und den Heizwert.

Für die ökologische Bewertung von entscheidender Bedeutung ist weiterhin die Ermittlung der Energiewirkungsgrade (EW) der Anlage, in der der heizwertreiche Anteil des Deponats zur energetischen Nutzung / thermischen Behandlung übergeben wird (MVA, EBS-Kraftwerk). Die EW, für welche die Ergebnisse dargestellt sind, betragen:

- Basisvarianten und Sensitivitäten WSG: elektrischer Wirkungsgrad 10 %, thermischer 32 %
- EW hoch: elektrischer Wirkungsgrad 22 %, thermischer 50 %.

Wichtig ist, dass die in Höhe des Wirkungsgrades produzierte Wärme auch vollständig genutzt wird, sonst müssen Abschläge des thermischen Wirkungsgrades vorgenommen werden. Grob kann davon ausgegangen werden, dass eine Veränderung des elektrischen Wirkungsgrades um 10 % im Treibhauseffekt einer gleichgerichteten Veränderung des thermischen Wirkungsgrades von 20 % entspricht, um eine Einordnung einer MVA mit davon abweichendem Verhältnis von elektrischem und thermischem Wirkungsgrad zu ermöglichen.



**Abbildung 10-1:** Treibhauseffekt - Ergebnisse aus der Sensitivitätsberechnung zu extremen Parameterausprägungen und der Deponie „Pohlsche Heide“

Im Ergebnis lässt sich festhalten:

Wenn die betrachtete Deponie eine erhöhte unkontrollierte Methanfreisetzung aufweist, sind durch die Einordnung im Bereich GF 40 % auch schon einfache Rückbau-

szenarien gegenüber dem Weiterbetrieb der Deponie vorteilhaft, wenn diese einen geringen Kunststoffgehalt aufweist.

Bei geringen Kunststoffgehalten <10 M.-% (WSG niedrig) kann auch schon mit einer zusätzlichen Aufbereitung des Feinkorns ohne weitere Behandlung des Grobkorns (Szenario 2a) eine geringe Entlastung im Treibhauseffekt erreicht werden, sonst kommt es zu Netto-Belastungen. Bei hohen Metallgehalten (4,5 M.-%) lohnt sich der Aufwand für zusätzliche Metallabscheidung und Pyrolyse deutlich (Szenario 2b). Eine deutliche Entlastung ergibt sich unabhängig vom Wertstoffgehalt aber nur dann, wenn das Grobkorn zu EBS und SBS verarbeitet wird, um in EBS-HKWs und Zementwerken behandelt werden zu können (Szenario 3b). Wenn der Kunststoffgehalt der Deponie >10 M.-% (WSG hoch) beträgt und die anderen Wertstoffgehalte gering sind, gilt dies noch verstärkt und ist dann mit noch deutlich höheren Entlastungen verbunden, wohingegen höhere Kunststoffgehalte bei den einfacheren Varianten eher Lasten bedingen.

Wenn eine MVA mit höheren energetischen Wirkungsgraden zur Verfügung steht, ist mit allen Szenarien eine deutliche Entlastung verbunden. Als Optimum ist dann ein Aufbereitungsverfahren vom Typ Szenario 2b anzustreben, in welchem eine Aufbereitung des Feinkorns erfolgt, das Grobkorn aber bis auf die Metallabscheidung nicht weiter behandelt werden muss.

Für die „Pohlsche Heide“ ist während der Stilllegungs- und Nachsorgephase von einer Gasfassungsrate von 65 % auszugehen. Daher ist aus ökologischer Sicht für die Deponie „Pohlsche Heide“ ein geringer Aufbereitungsaufwand nur möglich, sofern Kraftwerke mit hohem Energiewirkungsgrad zur Verfügung stehen. Ist dies nicht der Fall, ist ein ELFM mit mindestens mittlerem Aufbereitungsaufwand (inkl. Feinkornaufbereitung) ökologisch vorteilhaft. Selbstverständlich kann man sich für Verfahren mit hohem Aufbereitungsaufwand entscheiden. Hier sind höhere Risiken und Forschungs- und Entwicklungsbedarfe erforderlich. Für die nachfolgende ökonomische Betrachtung werden demnach die ELFM-Szenarien 2a und 2b zur weitergehenden Prüfung in die engere Auswahl genommen.

Eine erste grobe **ökonomische Einordnung** einer bestimmten Deponie kann anhand der Parameter Grundstückspreis, Volumenwert, Brennstoffwert, Transportentfernung sowie Nachsorgedauer vorgenommen werden. Da der Grundstückspreis bzw. der Volumenwert bereits als gewichtige Einflussfaktoren bezüglich der Wirtschaftlichkeit eines ELFM-Projektes identifiziert worden sind (vgl. Kapitel 8) und diese nicht von globalen Marktentwicklungen sondern vom Standort der Deponie bzw. regionalen Gegebenheiten abhängen, wird der Einfluss aller weiteren Parameter in Abhängigkeit der zwei genannten dargestellt. Sowohl für den Grundstückspreis als auch für den Volumenwert sind jeweils ein niedriger und ein hoher Wert angenommen worden.

- Grundstückspreis:       niedrig: 10 €/m<sup>2</sup>,       hoch: 410 €/m<sup>2</sup>
- Volumenwert:           niedrig: 10 €/m<sup>3</sup>,       hoch: 40 €/m<sup>3</sup>

Für jeden dieser vier Werte sind die Basisvariante sowie drei Sensitivitäten berechnet worden (die genaue Ausprägung der Parameter der verschiedenen Sensitivitäten kann Tabelle 10-1 entnommen werden):

- Die Basisvariante nutzt die Parametereinstellungen, die auch der ökonomischen Bewertung für die „Pohlsche Heide“ in Kapitel 8 zugrunde gelegt sind.

- Die Sensitivität „Brennstoffwert hoch“ geht davon aus, dass der Wert für Brennstoff bzw. Energie allgemein steigt, weswegen der Deponiebetreiber weniger Geld bezahlen muss, wenn er heizwertreiche Fraktionen an eine MVA oder ein EBS-HKW abgibt.
- Die Sensitivität „Transportentfernung weit“ zeigt auf, welchen Einfluss weite Entfernungen zu den stoffstromspezifischen Behandlungsanlagen wie MVA, EBS-HKW oder Pyrolyse auf die Transportkosten und damit auf die Wirtschaftlichkeit eines ELFM hat. Für die Basisvariante ist davon ausgegangen worden, dass Vorkonditionierung und Feinkornaufbereitung direkt auf dem Deponiegelände erfolgen und sich MVA und EBS-HKW im 15 km entfernten Ort befinden, für die Spezialanlagen wie Pyrolyse, SBS- und Kunststoffaufbereitung wird eine Entfernung von 50 km angenommen (s. Tabelle 10-1).
- Die Sensitivität „Deponienachsorge 70 Jahre“ betrachtet den Einfluss einer verlängerten Nachsorgedauer auf die Wirtschaftlichkeit eines ELFM. Anstelle der in der Basisvariante angenommenen 30 Jahre wird für diese Sensitivität 70 Jahre angenommen, da in der Literatur häufig davon ausgegangen wird, dass eine Entlassung aus der Nachsorgeverpflichtung nach 30 Jahren nicht der Regelfall sein wird.
- Aufgrund ihres geringen Hebels (vgl. Kapitel 8) werden Metalle hier nicht explizit aufgeführt.

Die Ergebnisse der vier Analysen für die vier verschiedenen Ausprägungen von Volumen- und Flächenwert können Abbildung 10-3 entnommen werden.

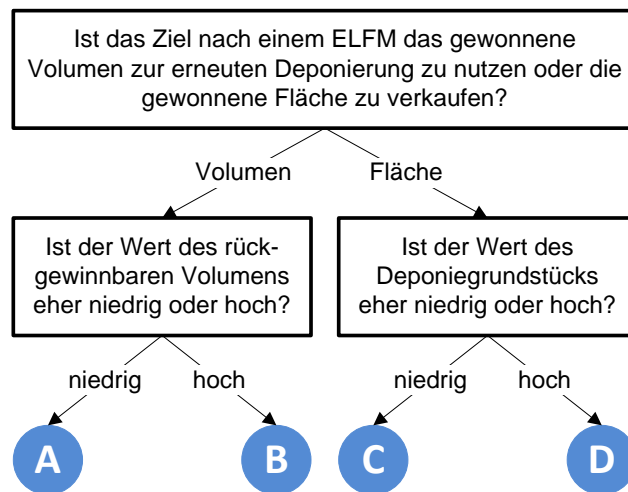
**Tabelle 10-1:** Parameterausprägung für die unterschiedlichen Sensitivitäten

Parameter	„Basis“	„Brennstoffwert hoch“	„Transportentfernung weit“	„Deponienachsorge 70 Jahre“
Behandlungspreis MVA	-59,50 €/t*	-33 €/t*	-59,50 €/t*	-59,50 €/t*
Behandlungspreis EBS-HKW	-47,50 €/t*	-25 €/t*	-47,50 €/t*	-47,50 €/t*
Transportentfernung zu:				
• MVA, EBS-HKW	15 km	15 km	50 km	15 km
• Pyrolyse, SBS, Kunststoffaufbereitung	50 km	50 km	100 km	50 km
Transportkostensatz	0,2 €/t*km	0,2 €/t*km	0,2 €/t*km	0,2 €/t*km
Dauer Nachsorge	30 Jahre	30 Jahre	30 Jahre	70 Jahre

\*ein negativer Wert bedeutet, dass der Deponiebetreiber Geld für die Abgabe/Weitergabe des Materials zahlen muss

Um sich selbst einzuordnen, sollte zunächst die Frage beantwortet werden, welche Nachnutzungskonzepte für das Deponiegelände nach Beendigung des ELFM verfolgt

werden sollen: Soll die Fläche zur anderweitigen Nutzung verkauft oder soll die Deponie bestehen bleiben und das gewonnene Volumen zur erneuten Deponierung genutzt werden? In einem zweiten Schritt ist zu klären, ob für das entsprechende Nachnutzungskonzept mit hohen oder niedrigen Werten gerechnet werden kann. Je nach dem ist eine Einordnung in eines der vier Diagramme aus Abbildung 10-3 sinnvoll. Das hier beschriebene Vorgehen kann anhand Abbildung 10-2 nachvollzogen werden. Ist beispielsweise die Rückgewinnung des Volumens zur Weiternutzung der Deponie geplant, der Wert für Deponievolumen jedoch eher niedrig, so ist Diagramm A anzuschauen. Hier stellt sich die Frage, ob z. B. aufgrund freier Kapazitäten in thermischen Behandlungsanlagen eher geringe Kosten bei der Abgabe der entsprechenden Fraktionen erzielt werden können (was der Sensitivität „Brennstoffwert hoch“ entspricht), ob sich die erforderlichen Behandlungsanlagen im engen Umkreis oder weiter entfernt befinden oder ob davon ausgegangen werden muss, dass die Deponienachsorge nach den üblichen 30 Jahren noch nicht abgeschlossen sein wird. Je nach dem sollte die Entscheidung für ein bestimmtes ELFM-Szenario getroffen werden.



**Abbildung 10-2:** Vorgehen zur Einordnung anhand der Diagramme zur Sensitivitätsberechnung

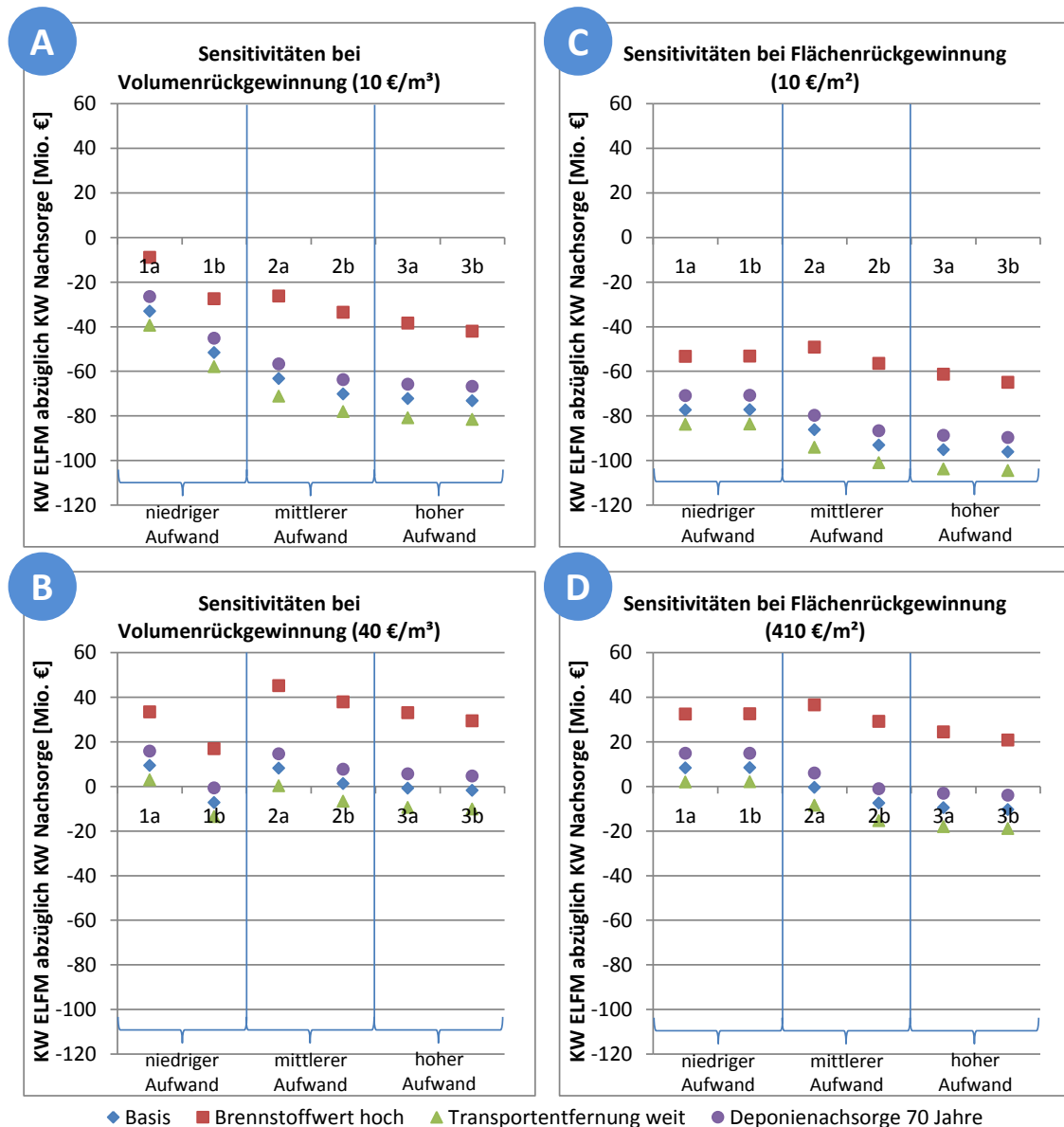
Im Ergebnis lässt sich festhalten, dass bei niedrigen Volumen- und Flächenwerten (Diagramme A und C in Abbildung 10-3) die Deponiestilllegung und -achsorge einem ELFM vorzuziehen ist. Sollte dennoch ein Rückbau durchgeführt werden, sind eher einfache Szenarien ökonomisch vorteilhaft.

Die Vorteilhaftigkeit einfacher Szenarien gilt ebenfalls für hohe Flächenpreise (Diagramm D, Abbildung 10-3). Mit steigendem Volumenwert (Diagramm B, Abbildung 10-3) gewinnen die aufwändigen Szenarien an Vorteilhaftigkeit, weil hier das gesamte Deponievolumen gewonnen und vermarktet werden kann. Im Gegensatz hierzu erfolgt in den Szenarien 1a und 1b eine Wiedereinlagerung der Feinkornfraktion, sodass nur ein Teil des Deponievolumens wiedergewonnen werden kann. Für den Volumenwert von 40 €/m<sup>3</sup> schneidet Szenario 2a in der Basisvariante bereits genauso gut ab wie Szenario 1a.

Bei hohem Brennstoffwert schneidet in der Regel Szenario 2a am besten ab, da hier mehr Brennstoffe produziert werden als bei den Szenarien 1a und 1b, der technische Aufwand und damit auch die Kosten aber geringer sind als bei den Szenarien 2b bis 3b. Es wird deutlich, dass die Brennstoffpreise den größten Einfluss auf die ökonomische Vorteilhaftigkeit von ELFM haben. Demgegenüber führt eine verlängerte Deponienachsorge nur zu einer geringfügigen Besserstellung gegenüber der Basisvariante.



Bezüglich der Transportentfernung sind für die „Pohlsche Heide“ kurze Wege angenommen worden, sodass die Sensitivität „Transportentfernung weit“ zu einer Verschlechterung im Vergleich zur Basisvariante führt. Hier verschlechtern sich insbesondere die aufwändigeren Szenarien, da davon ausgegangen wird, dass es weniger spezielle Behandlungsanlagen wie Pyrolyse oder SBS-Aufbereitung gibt, als bspw. MVAs, wodurch weitere Transportwege anfallen. Der Einfluss der Parameter Deponienachsorge und Transportentfernung ist in etwa gleich bedeutend.



**Abbildung 10-3:** Ergebnisse aus der Sensitivitätsberechnung auf Basis unterschiedlicher Flächen- und Volumenwerte

Die Deponie „Pohlsche Heide“ kann aus ökonomischer Sicht wie folgt eingeordnet werden: Aufgrund des niedrigen Grundstückwertes ist davon auszugehen, dass die Rückgewinnung von Deponievolumen zur erneuten Ablagerung von Abfall angestrebt wird. Somit sind die Diagramme C und D in Abbildung 10-3 irrelevant. Den Diagrammen A und B ist zu entnehmen, dass für die Basisvariante der „Pohlschen Heide“ jeweils das ELFM-Szenario 1a am besten abschneidet. Kann ein hoher ( $\geq 40$  €/m³) Volumenwert erzielt werden, ist Szenario 2a annähernd gleichwertig zu Szenario 1a. Beide sind in dem Fall ökonomisch vorteilhaft gegenüber der Stilllegung und Nachsorge.

Bei niedrigem Volumenwert ist aus ökonomischer Sicht die Stilllegung und Nachsorge vorzuziehen.

### **Zusammenführung der ökonomischen und ökologischen Ergebnisse für das Beispiel „Pohlsche Heide“ mittels verbal-argumentativer Entscheidungsfindung:**

Aufgrund der Daseinsvorsorge hat der öffentlich rechtliche Entsorgungsträger zehn Jahre Versorgungssicherheit darzustellen. Im Kontext langwieriger Genehmigungsverfahren für den Neubau von Deponien bzw. Deponieabschnitten ist es im Fall der „Pohlschen Heide“ sinnvoll, die Volumengewinnung durch einen Deponierückbau gegenüber der Option Stilllegung und Nachsorge vorzuziehen. In diesem Fall können die nicht getätigten Investitionen für den Deponieneubau der Volumengewinnung gutgeschrieben werden. Es ist somit davon auszugehen, dass der Wert für Deponievolumen eher hoch ist. Zur Beantwortung der Frage, welches ELFM-Szenario angewendet werden soll, erfolgt ein Abwägen der ökonomischen und ökologischen Ergebnisse. Aus ökologischer Sicht ist mindestens ein mittlerer Aufbereitungsaufwand erforderlich. Aus ökonomischer Sicht ist ein geringer Aufbereitungsaufwand vorzuziehen, wobei sich 1a und 2a nur geringfügig unterscheiden. Daher würde an die Politik eine Entscheidungsvorlage gerichtet werden, dass 2a zu wählen ist, da hier das Volumen der gesamten Deponie zurückgewonnen werden kann (da keine Wiederablagerung der Feinkornfraktion erfolgt) und damit eine deutliche Laufzeitverlängerung der Deponie (Verfüllvolumen) geschaffen wird. Auf Basis dieser Entscheidung ist nun eine Detailplanung vorzunehmen. Der Kreis Minden-Lübbecke verfolgt diesen Ansatz weiter.

## **10.6. Wie ist ELFM in der Detailplanung zu konzeptionieren?**

Sollte die erste ökonomische und ökologische Bewertung zu dem Ergebnis führen, dass ELFM unter den gegebenen Randbedingungen sinnvoll erscheint, ist in die Detailplanung einzusteigen. Die grundsätzlichen Möglichkeiten zum Vorgehen sind geklärt, die Zusammensetzung des Deponats sowie die vorhandenen Behandlungs- und Verwertungskapazitäten bzw. der Bedarf an Neuanlagen sind erhoben worden. Es ist die grobe Richtung entschieden worden, ob ein einfaches Konzept mit Wiedereinlagerung der Feinfraktion oder ein ELFM mit Feinkornaufbereitung realisiert werden soll. Jetzt ist ein detaillierteres Konzept zu erarbeiten, an dessen Ende eine Genehmigung für ein ELFM, eine Planung und Umsetzung des Rückbaues (technische Planung) sowie eine Finanzierungsplanung steht.

### **Genehmigungsplanung**

Notwendige Maßnahmen zum Emissions- und Arbeitsschutz (ergibt sich aus der Genehmigung).

### **Planung des Rückbaus**

Die Planung des konkreten Rückbaus orientiert sich an den Gegebenheiten der Deponie nach Vorlage der erforderlichen abfallrechtlichen Genehmigung und Festlegung eines Zeitplans mit konkreten Rückbauabschnitten in Abhängigkeit der Behandlungskapazitäten oder mit Zwischenlagerung, Festlegung Personalausstattung, Festlegung Bedarf an Maschinen.

### Hinweise:

- Vor der Aufbereitung in der Anlage muss eine Baggervorsortierung für die Entfernung sehr großer, sperriger Abfälle direkt bei der Abgrabung geplant werden. Diese könnten gegebenenfalls einer Vorklassierung und/oder einer Vorzerkleinerung direkt

vor Ort auf der Deponie zugeführt werden. Die vorklassierten und vorzerkleinerten Abfälle können anschließend mit auf die Anlage gegeben oder anderweitig verwertet werden. Mit Hilfe dieser Baggervorsortierung können auch Sonderabfälle abgetrennt und einer Zwischenlagerung in z. B. verschließbaren Containern zugeführt werden, um sie dann einer geeigneten Entsorgung zuführen zu können.

- Aus der Entfernung zur Aufbereitungsanlage bestimmt sich die Anzahl an Baumaschinen, wie Muldenkipper und Bagger. Bei größeren Entfernungen kann auch über Transportbänder statt Muldenkipper nachgedacht werden.
- Die Investitionen in die Baumaschinen, welche zur Abgrabung benötigt werden, sind zu bestimmen.
- Die Betriebskosten der Baumaschinen sind zu ermitteln.

### **Planung der Vorkonditionierung und Aufbereitung der Grob- und Feinfraktion**

Für die Planung der Vorkonditionierung und Aufbereitung der verschiedenen abgetrennten Fraktionen ist zunächst zu entscheiden, ob diese auf der Deponie selbst erfolgen oder ob hierzu eine bestehende Anlage, z. B. eine MBA in der näheren Umgebung mitgenutzt werden soll. Je nachdem welche Wertstoffe abgetrennt werden sollen, sind die Siebschnitte für die Trennung der Fraktionen zur weiteren Behandlung festzulegen. Im Wesentlichen hat die Planung der Dauer der Aufbereitungsmaßnahme und der Menge der Outputstoffströme den größten Einfluss auf die heute ermittelten zukünftigen Zahlungen (Barwert).

Die weitere Konditionierung und Aufbereitung der Grobfraktion hängt davon ab, welche Verwertungswege eingeschlagen werden sollen.

In den einfachsten Varianten kann die gesamte Grobfraktion in einer MVA behandelt werden. Die Metalle werden dann nach der Verbrennung abgetrennt. Eine mechanische Abtrennung der Metalle bedingt in der Regel auch eine weitergehende Aufbereitung.

Die Abtrennung von Kunststoffen zum Recycling ist nur dann sinnvoll, wenn eine relevante Menge in guter Qualität abgeschieden werden kann. Etwas einfacher ist i. d. R. die Herstellung einer hochwertigen EBS-Fraktion für die Co-Verbrennung, die aber nur gelingt, wenn eine effektive PVC-Abtrennung erreicht werden kann.

Soll z. B. die Fläche der Deponie nach dem ELFM für andere Nutzungen zur Verfügung stehen, ist eine intensive Aufbereitung der Feinkornfraktion notwendig. Hierfür ist die Abtrennung und getrennte Aufbereitung der Fraktionen 10 – 60 mm und < 10 mm sinnvoll. Aus den beiden Fraktionen können jeweils Fe-Metalle und eine heizwertreiche Fraktion abgeschieden werden. Die mineralischen Fraktionen lassen sich weitgehend für eine Nutzung im Straßenbau oder als Sekundärrohstoff für die Zementindustrie aufbereiten. Belastete Restfraktionen, wie z. B. der Rückstand aus der Prozesswasseraufbereitung, sind entsprechend ihrer Qualität auf anderen Deponien zu entsorgen.

Soll mit möglichst geringem Aufwand eine Volumenreduktion erreicht werden, kann die Feinkornfraktion, ggf. nach einer biologischen Behandlung, wieder in der Deponie eingebaut werden.

### Hinweise:

- Eine Aufbereitung des Deponieaushubs kann je nach Aufbereitungsziel unterschiedlich komplex ausfallen. Es kann eine mobile, eine einfache, stationäre und eine sehr umfangreiche, komplexe stationäre Aufbereitungstechnik zur Anwendung kommen.
- Die Aufbereitungsanlage kann 1-, 2- oder auch 3-schichtig betrieben werden. Bei einem 3-Schichtbetrieb sind Zusatzkosten durch Nachtzuschläge sowie Sonn- und Feiertagen für das Personal und zusätzliche Schutzmaßnahmen gegen Lärm- und Staubemissionen zu beachten.
- Es ist zu beachten, dass die Personalarbeitszeit nicht der Anlagenlaufzeit gleich gesetzt werden kann. Die Anlage sollte mit einer Verfügbarkeit von 85 % angesetzt werden. Es müssen Wartungs-, Reparatur- und Pausenzeiten berücksichtigt werden.
- Wenn es sich nicht lohnt oder es nicht möglich ist, eine vorhandene Anlage zu nutzen oder umzubauen, dann muss eine passende Anlage entwickelt werden. Dafür müssen auf jeden Fall Zerkleinerungs-, Klassierungs- und Sortieraggregate für die mechanische Aufbereitung des Deponieguts ausgewählt werden.
- Die Auswahl der Aggregate sollte abhängig vom Durchsatz und auf der Grundlage von Korngrößenverteilungen und Stoffeigenschaften mit Planer und Hersteller erfolgen.
- Für die Ausschreibung der Leistungen für Maschinenteknik und Bau sind Lage- und Maschinenaufstellungs- und Baupläne zu entwickeln. Für die Bauplanung ist zu berücksichtigen, dass bei einem ungünstigen Anlagenstandort (Nähe zur Bebauung) oder Witterungsverhältnissen weitere Maßnahmen zur Emissionsbegrenzung wie Staub, Verwehungen oder Lärm notwendig werden können. Zur Planung der Außenanlagen gehören beispielsweise Wiegeeinrichtung, Büro- und Sozialräume, Parkplätze sowie ausreichend Lagerfläche für das angelieferte Material sowie ausreichend Platz für Umfahrungen und Logistik der anliefernden und abholenden Fahrzeuge.
- Im Ergebnis sind die notwendigen Investitionen in Umbauten, Aufbereitungsaggregate, sowohl mobil als auch stationär, Fördertechnik, Baumaschinen und Infrastruktur, wie Hallen, Gebäude und Außenanlagen konkret zu bestimmen.
- Die Betriebskosten der Anlagen und Infrastruktur sind detailliert zu ermitteln. Diese ergeben sich aus den Angaben der Hersteller und Lieferanten für Energieverbrauch und Strompreis, aus den Angaben zum Wirkungsgrad von z. B. Dieselgeneratoren bei mobilen Aggregaten, der Ermittlung der RWI-Kosten (Reparatur, Wartung und Instandhaltung) etc.
- Bei der Errichtung von Anlagen mit hohen Durchsatzkapazitäten, welche einen Rückbau von Deponien in sehr kurzen Zeiträumen ermöglichen, z. B. 5 Jahre, müssen von Beginn an Nachnutzungskonzepte entwickelt, bzw. der Rückbau mehrerer Deponien zur Auslastung der Anlagen parallel geplant werden

### **Finanzierungsplanung**

Aufbauend auf der Investitionsplanung mit Hilfe der in Kapitel 8 dargestellten Wirtschaftlichkeitsanalyse ist für die Realisierung des ELFM-Vorhabens ein Finanzierungsplan aufzustellen.

Für den Finanzierungsplan sollte ein ganzheitliches Bewertungsmodell entwickelt werden, in dem sämtliche Finanzierungsmittel (Eigenkapital und Fremdkapital) dem Kapi-

talbedarf (u. a. Investitionen in die gewählte Anlagenkonfiguration) für das ELFM-Projekt periodenbezogen über den gesamten Projektzeitraum gegenübergestellt werden.

Das Modell sollte der Abbildung und Analyse unterschiedlicher Finanzierungsstrategien, ggf. auch für mehrere Handlungsalternativen mit differierenden Anlagenkonfigurationen, dienen. Während der Durchführung eines ELFM-Vorhabens sollte sich das Modell zudem als Instrument der Wirtschaftsplanung und des Projektcontrollings eignen.

## Literaturverzeichnis

- Achternbosch, Bräutigam 2000 Achternbosch, M.; Bräutigam, K.-R.: Herstellung von Zementklinker – Verfahrensbeschreibung und Analysen zum Einsatz von Sekundärbrennstoffen. Wissenschaftlicher Bericht FZKA 6508, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, 2000
- Alwast 2015 Alwast, H.: 10 Jahre nach TASI – Neue Ausschreibungsrunde 2015. Mengen, Potenziale, Märkte und Preise. In: 27. Kasseler Abfall- und Bioenergieforum, Bio- und Sekundärrohstoffverwertung, 28.-30.04.2015, Kassel, Online verfügbar : [http://www.abfallforum.de/images/downloads/tagungen/abfallforum\\_2015\\_vortrag\\_alwast.pdf](http://www.abfallforum.de/images/downloads/tagungen/abfallforum_2015_vortrag_alwast.pdf)
- Alwast, Riemann 2010 Alwast, H., Riemann, A.; Verbesserung der umweltrelevanten Qualitäten von Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen; [http://www.prognos.com/fileadmin/pdf/publikationsdateibank/UBA\\_Endbericht.pdf](http://www.prognos.com/fileadmin/pdf/publikationsdateibank/UBA_Endbericht.pdf), 2010, (abgerufen am 18.03.2015)
- Baier, Horix 2014 Baier, H.; Horix, M.: Moderne Zementwerke und strategische Ansätze zur Aufbereitung von Ersatzbrennstoffen – Eine aktuelle Bestandsaufnahme –. In: Energie aus Abfall, Band 11, K.J. Thomé-Kozmiensky, Michael Beckmann (Hrsg.), TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2014, S. 859 – 869
- Barghoorn 1981 Barghoorn, M.: Bundesweite Hausmüllanalyse 1979, 80: Erstellung von Probeplänen zur Untersuchung des Abfallaufkommens nach Art und Zusammensetzung in ausgewählten Städten und Landkreisen. Forschungsbericht 10303503, Umweltbundesamt, Berlin, 1981
- Barghoorn et al. 1986 Barghoorn, M.; Gössele, P.; Kaworski, W.: Bundesweite Hausmüllanalyse 1983 – 1985: laufende Aktualisierung des Datenmaterials aus der bundesweiten Hausmüllanalyse. Forschungsbericht 10303508, Umweltbundesamt, Berlin, 1986
- Baumgarte 2015 Standardkessel Baumgarte Power Systems Holding GmbH: Liefer- und Leistungsspektrum. URL: [www.standardkessel-baumgarte.com](http://www.standardkessel-baumgarte.com), (letzter Abruf 09/2015)
- Becker 2008 Becker, H. P.: Investition und Finanzierung. 2. Auflage, Gabler, Wiesbaden, 2008.
- Beckmann et al. 2009 Beckmann, M.; Scholz, R.; Flamme, S.; Seifert, H.: Substitution von Regelbrennstoffen durch Ersatzbrennstoffe. Endbericht zum IGF-Vorhaben Nr. 14894 BG der Forschungsvereinigung DECHEMA Gesell-

- schaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., Frankfurt am Main, 2009
- Beckmann, Thomé-Kozmiensky 2005  
Beckmann, M.; Thomé-Kozmiensky, K.J.: Das Ersatzbrennstoffproblem – Aufkommen, Charakterisierung und Einsatz, In: Ersatzbrennstoffe – Herstellung und Verwertung -, Band 5, K.J. Thomé-Kozmiensky, Michael Beckmann (Hrsg.), TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2005, S. 3 – 32
- BGR 2012  
Huy, D. (Koordination), Andruleit, H., Babies, H.-G., Homberg-Heumann, D., Meßner, J., Neumann, W., Röhling, S., Schauer, M., Schmidt, S., Schmitz, M., Sievers, H., Deutschland – Rohstoffsituation 2012
- Bockreis, Knapp 2011  
Bockreis, A.; Knapp, J.: Landfill Mining - Deponien als Rohstoffquelle. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 63 (3-4), S. 70–75, 2011
- Brammer et al. 1997  
Brammer, F.; Bahadir, M.; Collins, H.-J.; Hanert, H.; Koch, E.: Rückbau von Siedlungsabfalldeponien. Vieweg+Teubner Verlag, 1997
- Braun 2001  
Braun, H.: Sekundärbrennstoffeinsatz in der Zementindustrie – von Altreifen bis zum Tiermehl. Vortrag im Rahmen des XVII. Gesteinshüttenkolloquium, Leoben, 2001
- Breitenstein et al. 2013  
Breitenstein, B., Goldmann D., Quedenfeld, I: Das RENE-Verfahren zur Rückgewinnung von Metallen aus Verbrennungsrückständen; Aschen, Schlacken, Stäube aus Abfallverbrennung und Metallurgie, TK-Verlag, Neuruppin, 2013
- Breuer 2012  
Breuer, W.: Investition I – Entscheidung bei Sicherheit. 4. Auflage, Gabler, Wiesbaden, 2012
- CEMEX 2014  
CEMEX WestZement GmbH: Technologische und Genehmigungsrechtliche Anforderungen. Beckum, 2014
- CML 1992  
Environmental life cycle assessment of products, Guide and backgrounds, Center of Environmental Science (CML), Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO), Fuels and Raw Materials Bureau (B&G), Leiden, 1992
- Deike et al. 2012  
Deike R., Ebert D., Warnecke R., Vogell M.; Abschlussbericht zum Projekt „Recyclingpotenziale bei Rückständen aus der Müllverbrennung“, 2012, [https://www.itad.de/information/studien/20130110DEIK\\_EHMVAREcyclingpotentialAbschlussbericht.pdf](https://www.itad.de/information/studien/20130110DEIK_EHMVAREcyclingpotentialAbschlussbericht.pdf) (abgerufen am 18.03.2015)

- Diener et al. 2015 Diener, A.; Kieckhäfer, K.; Schmidt, K.; Spengler, T. S.: Abschätzung der Wirtschaftlichkeit von Landfill-Mining-Projekten. In: Müll und Abfall, 47 (1), S. 4-12, 2015
- DWA 2002 Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.: AB AK-6 - Umlagerung und Rückbau von deponierten Abfällen, Hennef, 2002
- DWA 2012 Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.: Rückbau von deponierten Abfällen. DWA-Themen T5/2012, Hennef, 2012
- Dyckerhoff 2015 Dyckerhoff GmbH: Erhöhung des Anteils von Sekundärbrennstoffen an den erforderlichen Wärmebedarf von 75 % am Drehrohrofen 8 resp. 60 % am Drehrohrofen 4 auf bis zu 100 % einschließlich der dazugehörigen Maßnahmen zur Anlagenoptimierung und zur Emissionsminderung und Änderung der Schwermetallgehalte im Eisenoxidträger, Scoping-Papier, Wiesbaden, 2015
- Dyckhoff, Spengler 2007 Dyckhoff, H.; Spengler, T. S.: Produktionswirtschaft: eine Einführung für Wirtschaftsingenieure. Berlin u. a.: Springer-Verlag, 2007
- Fandel 2005 Fandel, G.: Produktion I: Produktions- und Kostentheorie. Berlin u. a.: Springer-Verlag, 2005
- Flamme 2002 Flamme, S.: Energetische Verwertung von Sekundärbrennstoffen in industriellen Anlagen – Ableitung von Maßnahmen zur umweltverträglichen Verwertung. Dissertation, Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal, Wuppertal, 2002
- Forrester 1972 Forrester, Jay W.: Der teuflische Regelkreis, Das Globalmodell der Menschheitskrise, Ein Buch der „Öffentlichen Wissenschaft“, bei Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, Stuttgart, 1972
- Fricke et al. 2011 Fricke, K.; Münnich, K.; Schulte, B.: Urban Mining – ein Beitrag für die zukünftige Ressourcensicherung. In: Ressource Abfall, Festschrift zur 50-Jahr-Feier des BDE, TK Verlag, Neuruppin, 2011
- Fröhling 2005 Fröhling, M.: Zur taktisch-operativen Planung stoffstrombasierter Produktionssysteme, dargestellt an Beispielen aus der stoffumwandelnden Industrie. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verlag, 2005
- Geldermann 2014 Geldermann, J.: Anlagen- und Energiewirtschaft, Verlag Franz Vahlen, München, 2014
- Götze 2014 Götze, U.: Investitionsrechnung – Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben. 7. Auflage, Springer, Heidelberg, 2014



- Grünbein et al. 2015 Grünbein M., Wegkamp D., Rüßmann D.; Steigerung der Wertstoffseparation von Rostaschen aus der Nasentschlackung durch Optimierung konventioneller Technik; Mineralische Nebenprodukte und Abfälle, Band 2, Hrsg: Thomé-Kozmiensky, K.J., TK-Verlag, Neuruppin, 2015
- Gupta 1990 C. K. e. a. Gupta (ed.). Hydrometallurgy in extraction processes (CRC Pr. Boca Raton, Fla. 1990)
- Hauk, Spindeldreher 2004 Hauk, R.; Spindeldreher, O.: CONTHERM – Thermal Utilisation of Waste in a Power Plant by Integrated Waste Pyrolysis of High Calorific Residual Derived Fuels. VGB PowerTech Journal 07/2004
- Hölzle 2010 Hölzle, I.: Vom Deponierückbau bis zum landfill-mining – eine Synthese internationaler Untersuchungen. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft. August 2010, Volume 62, Issue 7, pp 155-161
- IPCC 2007 IPCC Fourth Assessment Report – Contribution of Working Group I: Technical Summary 2007; 31.03.2008
- itad 2015 Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V.: Anforderungen an Abfälle zur Verbrennung. URL: (), letzter Abruf 09/2015
- Jones et al. 2013 Jones, P. T.; Geysen, D.; Tielemans, Y; van Passel, S.; Pontikes, Y.; Blanpain, B.; Quaghebeur, M.; Hoekstra, N.: Enhanced Landfill Mining in view of multiple resource recovery: a critical review. Journal of Cleaner Produktion 55 (2013), S. 45-55.
- Kersting 2015 Kersting, D.; Situation der Hausmüllverbrennungssachen, Industrie – Technik – Kosten und Markt; Mineralische Nebenprodukte und Abfälle, Band 2, Hrsg: Thomé-Kozmiensky, K.J., TK-Verlag, Neuruppin, 2015
- Klöpffer, Renner 1995 Klöpffer, W., Renner, I.: Methodik der Wirkungsbilanz im Rahmen von Produkt-Ökobilanzen unter Berücksichtigung nicht oder nur schwer quantifizierbarer Umwelt-Kategorien, UBA-Texte 23/95, Berlin, 1995
- Kopp 2001 Kopp, J.: Wasseranteile in Klärschlammuspensionen - Messmethode und Praxisrelevanz. Veröffentlichung des Inst. f. Siedlungswasserwirtschaft der TU Braunschweig, Heft 66, 2001
- Kriete 2002 Kriete, B.: Energos-Heiz- und Heizkraftwerke – energetische Verwertung von Ersatzbrennstoffen aus Abfällen, in: Ersatzbrennstoffe. Band 2, K.J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.), TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2002, S. 96-108

- Kuchta et al. 2015 Kuchta, K., Enzner, V., „Metallrückgewinnung aus Rostaschen aus Abfallverbrennungsanlagen - Bewertung der Ressourceneffizienz,“ Entsorgungsgemeinschaft der deutschen Entsorgungswirtschaft e.V. - Ed-DE, Hattingen, 2015.
- Loew 2001 Loew, T.: Systeme der Umweltkostenrechnung. In: UBA (Hrsg.): Handbuch Umweltcontrolling, Verlag Franz Vahlen, München, S.505-522., 2001
- Lukas et al. 2008 Lukas R., Bleischwitz R., Krause M., Stürmer M., Scharp M.; Kupfereffizienz – unerschlossene Potenziale, neue Perspektiven, 2008 (abgerufen am 18.03.2015)
- MHKW Rothensee 2015 MHKW Rothensee GmbH: Annahmebedingungen und Annahmekatalog der MHKW GmbH. URL: [www.mhkw-rothensee.de](http://www.mhkw-rothensee.de), Stand 03/2015
- Mocker et al. 2009 Mocker, M., Franke, M., Stenzel, F., Faulstich, M.: Von der Abfallwirtschaft zur Ressourcenwirtschaft. In: Flamme, Gallenkemper, Gellenbeck, Bidlingmaier, Kranert, Nelles, Stegmann (Hrsg.): Tagungsband der 11. Münsteraner Abfallwirtschaftstage, S. 27-33, 2009
- Mrotzek et al. 2006 Mrotzek, A.; Marzi, T.; Görner, K.: Ersatzbrennstoffe – Einteilung, Herstellung, Einsatz und Charakterisierung. In: Thermische Abfallverwertung 2006, VGB Fachtagung, Hamburg, 03/05/2006
- Müller 2006 Müller, D.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre für Ingenieure. Springer, Berlin, 2006
- Nispel 2012 Nispel, J.: Ressourcenpotenzial von Hausmülldeponien – am Beispiel der Kreismülldeponie Hechingen -. Dissertation Institut für Bodenkunde und Bodenerhaltung der Justus-Liebig-Universität Gießen, 2012
- Penkuhn 1997 Penkuhn, T: Umweltintegriertes Stoffstrommanagement in der Prozessindustrie. Peter Lang Verlag, Frankfurt a. M., 1997
- Peters, Timmerhaus 1991 Peters, M. S.; Timmerhaus, K. D.: Plant Design and Economics for Chemical Engineers. New York, McGraw-Hill, 1991
- Peters et al. 2002 Peters, M. S.; Timmerhaus, K. D.; West, R. E.: Plant design and economics for chemical engineers. New York: McGraw-Hill, 2002
- PlasticsEurope 2008 Daten und Fakten zu Kunststoff 2007, Kunststoffproduktion, Verbrauch und Verwertung in Europa 2007; <http://www.plasticseurope.org/cust/documentrequest.aspx?DocID=45084>

- Pomberger, Sarc 2014 Pomberger, R.; Sarc, R.: Use of solid Recovered Fuels in the Cement Industry. In: Waste Management, Volume 4, K.J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.), TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2014, S. 471-488
- Quicker et al. 2014 Quicker, P; Noel, Y.; Neuerburg, F.; Huras, A.: Sachstand zu den alternativen Verfahren für die thermische Entsorgung von Abfällen. Schlussbericht Vorhaben Z6-30345/18, Dessau-Roßlau, 09/2014
- Rettenberger 2009 Rettenberger, G.: Zukünftige Nutzung der Deponie als Ressourcenquelle. In: Flamme, Gallenkemper, Gellenbeck, Bidlingmaier, Kranert, Nelles, Stegmann (Hrsg.): Tagungsband der 11. Münsteraner Abfallwirtschaftstage, S. 101 - 109, 2009
- Rettenberger 2002 Rettenberger, G.: Deponierückbau als Alternative zur Sanierung?, 2002
- Rettenberger 1998 Rettenberger, G.: Rückbauen und Abgraben von Deponien und Altablagerungen. Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, 1998
- Rotheut et al. 2015 Rotheut, M.; Horst, T.; Quicker, P.: Thermo-mechanical treatment of metal composite fractions. Chemie Ingenieur Technik, Volume 87, Issue 11, 11/2015
- Schatka 2011 Schatka, A.: Strategische Netzwerkgestaltung in der Prozessindustrie. Wiesbaden; Gabler Verlag, 2011
- Schröer 2011 Schröer, R.: Co-Verbrennung von Siedlungsabfällen in Kleinanlagen zur dezentralen Energieversorgung und Abfallentsorgung. Dissertation, Universität Kassel, 2011
- Schubert 1996 Schubert S: Aufbereitung fester Stoffe, Band II Sortierprozesse, S. 41 – 73. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart, 1996
- Sormunen et al. 2008 Sormunen, K.; Ettala, M.; Rintala, J.: Detailed internal characterisation of two Finnish landfills by waste sampling. Waste Management 28, S. 151–163, 2008
- Spengler 1998 Spengler, T.: Industrielles Stoffstrommanagement – Betriebswirtschaftliche Planung und Steuerung von Stoff- und Energieströmen in Produktionsunternehmen. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 1998
- SRS EcoTherm 2008 SRS EcoTherm GmbH: Allgemeine Annahmbedingungen. URL: [www.srs-ecotherm.de](http://www.srs-ecotherm.de), Stand 08/2008
- Stegmann et al. 2006 Stegmann, R.; Heyer, K.-U.; Hupe, K.: Deponienachsorge – Handlungsoptionen, Dauer, Kosten und quantitative Kriterien für die Entlassung aus der Nachsorge.

- Förderkennzeichen (UFOPLAN) 204 34 327; Buch- & Offsetdruckerei Stubbemann GmbH, Hamburg. 2006
- Sutco 2015 Sutco Recyclingtechnik GmbH: Aufbereitung von Schlacke / Asche aus Verbrennung. URL: [www.sutco.de](http://www.sutco.de), (letzter Abruf 10/2015)
- SWD-AG 2015 Stadtwerke Düsseldorf AG: Grenz- und Richtwerte der Müllverbrennungsanlage Düsseldorf. URL: [www.swd-ag.de](http://www.swd-ag.de), (letzter Abruf 10/2015)
- Thiel 2013 Thiel, S.: Ersatzbrennstoff-Kraftwerke in Deutschland und Österreich. In: Energie aus Abfall, Band 10, K.J. Thomé-Kozmiensky, Michael Beckmann (Hrsg.), TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2013, S. 837 – 852
- Thomé-Kozmiensky 2005 Thomé-Kozmiensky, K.J.: Vorschaltanlagen für die Abfallverbrennung. In: Ersatzbrennstoffe – Herstellung und Verwertung -, Band 5, K.J. Thomé-Kozmiensky, Michael Beckmann (Hrsg.), TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2005, S. 485 - 535
- Tietze 2010 Tietze, U.: Einsatzmöglichkeiten für gefährliche Abfälle im Zementwerk Rüdersdorf. Vortrag im Rahmen der In-foveranstaltung Thermische Verfahren der Abfallentsorgung, IHK Potsdam (Veranst.), Potsdam, 01/2010
- TKIS 2015 ThyssenKrupp Industrial Solutions AG: Spezielle PREPOL-Calciniersysteme für unterschiedliche Aufgabenprofile. URL: <http://www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com>, (letzter Abruf 09/2015)
- Umweltamt Kiel 2005 Staatliches Umweltamt Kiel: Genehmigung TEV Neumünster. URL: [www.stadtwerke-neumuenster.de](http://www.stadtwerke-neumuenster.de), Stand 03/2005
- Van Vossen, Prent 2011 Van Vossen W.J., Prent, O.J.: Feasibility Study Sustainable Material and Energy Recovery from Landfills in Europe. Proceedings Sardinia 2011, Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy. 2011
- VDI 2001 VDI 3800 – Ermittlung der Aufwendungen für Maßnahmen zum betrieblichen Umweltschutz, Beuth, Berlin, 2001
- VDZ 2005 Verein Deutscher Zementwerke e.V., Forschungsinstitut der Zementindustrie (Hrsg.): Tätigkeitsbericht 2003 - 2005. VBT Verlag Bau + Technik, Düsseldorf, 2005
- VDZ 2008 Verein Deutscher Zementwerke e.V., Forschungsinstitut der Zementindustrie (Hrsg.): Zement-Taschenbuch. 51. Ausgabe, VBT Verlag Bau + Technik, Düsseldorf, 2008

- VDZ 2012 Verein Deutscher Zementwerke e.V., Forschungsinstitut der Zementindustrie (Hrsg.): Tätigkeitsbericht 2009 - 2012. VBT Verlag Bau + Technik, Düsseldorf, 2012
- Walther 2010 Walther, G.: Nachhaltige Wertschöpfungsnetzwerke: Überbetriebliche Planung und Steuerung von Stoffströmen entlang des Produktlebenszyklus. Wiesbaden; Gabler-Verlag, 2010
- Wiemer et al. 2009 Wiemer, K., Bartsch, B., Schmeisky, H.: Deponien als Rohstofflagerstätten von morgen – Ergebnisse einer hessenweiten Untersuchung. In: Wiemer, Kern (Hrsg.): Bio- und Sekundärrohstoffverwertung IV, Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, Witzenhausen, 2009, S. 685 – 716
- Zimniak 2004 Zimniak, Joachim: Analyse von Grundprozessen der Aufbereitung von Kompositwerkstoffen aus ausgewählten Kunststoff- und Gummiabfällen. Habilitationsschrift. Technische Universität Chemnitz. 2004 URL: <http://archiv.tu-chemnitz.de/pub/2004/0177>
- ZVHO 2015 Zweckverband für Abfallverbrennung im Bezirk Horgen: Betriebsreglement für die KVA Horgen. URL: [www.kvahorgen.ch](http://www.kvahorgen.ch),( letzter Abruf 09/2015)



## 11. ANHANG

### 11.1. Anhang 1

# Zulassungsrechtliche Anforderungen für den Deponierückbau - Leitfaden -

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,  
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen



# **Inhaltsverzeichnis**

## **1. Einführung**

## **2. Rechtsgrundlagen des Deponierückbaus**

## **3. Zulassungsverfahren –**

### **Rechtsgrundlagen, Verfahrensarten, Ablauf der Verfahren**

- 3.1 Planfeststellungsverfahren, Plangenehmigungsverfahren und Anzeigeverfahren nach KrWG
- 3.2 Erforderliche Antragsunterlagen für das Zulassungsverfahren nach KrWG
- 3.3 Arbeitsschutz
- 3.4 Genehmigungsverfahren und Anzeigeverfahren nach BImSchG für Anlagen zur Lagerung oder Behandlung von Abfällen
- 3.5 Erforderliche Antragsunterlagen für das Genehmigungsverfahren nach BImSchG
- 3.6 Anordnungen (Sanierungsplan) nach BBodSchG

## **4. Rechtliche Vorgaben für den Wiedereinbau**

## **5. Sicherheitsleistung, Rückstellung, Gebühren**

## **6. Empfehlungen für künftige rechtliche Regelungen**

## **7. Literatur / Verfasser**



## 1. Einführung

Deponierückbau ist die Abgrabung der auf einer Deponie abgelagerten Abfälle einschließlich deren Aufbereitung und Verwertung. Es ist möglich, ganze Deponien zurückzubauen oder nur einzelne Deponieabschnitte. Die Abfälle, die nicht verwertet werden können, sind ordnungsgemäß zu entsorgen.

Die Gründe für einen Deponierückbau sind sehr unterschiedlich, im Wesentlichen können folgende angeführt werden:

- Deponieraumgewinnung
- Flächenrückgewinnung
- Grundwasserschutz/Umweltschutz
- Vermeidung von Kosten zur Stilllegung und Nachsorge
- Energetische Abfallverwertung der heizwertreichen Teilfraktionen
- Stoffliche Abfallverwertung von Teilfraktionen.

Während in der Vergangenheit eher Rückbauprojekte zur Deponieraum- und Flächenrückgewinnung realisiert wurden, sind in den letzten Jahren vor allem Gründe der Ressourcenschonung in den Vordergrund getreten. Die auf Deponien abgelagerten Abfälle stellen ein hohes Rohstoffpotenzial dar, dessen Nutzung in Bezug auf den Klima- und Ressourcenschutz anzustreben ist. Im Bereich von Politik und Wissenschaft wird somit das Thema "Urban Mining", d. h. Rohstoffrückgewinnung im Siedlungsbereich, als relevant eingestuft. Hierzu gehört auch der Deponierückbau (Landfill Mining).

Im Rahmen des BMBF-Forschungsschwerpunkts „r<sup>3</sup> - Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien“ wird das Forschungsvorhaben "Entwicklung innovativer Verfahren zur Rückgewinnung ausgewählter Ressourcen aus Siedlungsabfall- und Schlackendeponien" (Verbundvorhaben TÖNSLM) umgesetzt.

Bei diesem BMBF-Forschungsvorhaben steht vor allem die Rückgewinnung von Metallen und anderen Wertstoffen im Vordergrund. Dabei wird ein Gesamtsystem entwickelt zur Rückgewinnung ausgewählter Ressourcen einschließlich Wirtschaftlichkeitsberechnungen und Ökobilanz. Letztlich erfolgt die Bereitstellung eines Leitfadens zur Entscheidungsfindung und zur Umsetzung von Deponierückbauprojekten.

Der hier vorliegende Leitfaden zu genehmigungsrechtlichen Anforderungen für den Deponierückbau ergänzt diesen Leitfaden zum Deponierückbau.

## 2. Rechtsgrundlagen des Deponierückbaus

Für den eigentlichen Rückbau einer Deponie kommen zwei Rechtsbereiche zur Anwendung:

- Abfallrecht oder
- Bodenschutzrecht

Die dann weiterhin noch erforderlichen Anlagen zur Lagerung oder Behandlung von Abfällen werden geregelt durch das

- Bundes-Immissionsschutzgesetz

Deponien unterliegen grundsätzlich dem Abfallrecht. Wenn der Betreiber einer Deponie aus der Nachsorgepflicht entlassen wurde, d. h. nach dem Ende der Nachsorgephase, fallen Deponien als Altablagerungen unter das Bodenschutzrecht.

**Der Rückbau einer Deponie zum Zwecke der Wiedergewinnung von Rohstoffen in der Stilllegungs- oder Nachsorgephase (§ 40 KrWG) oder nach dem Ende der Nachsorgephase ist bislang weder im Abfallrecht noch im Bodenschutzrecht ausdrücklich vorgesehen. /1/**

### Abfallrecht

In der EG-Deponierichtlinie (1999/31/EG) sind keine ausdrücklichen Regelungen zum Deponierückbau enthalten. Sie regelt nur das Stilllegungs- und Nachsorgeverfahren (Art. 13).

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG, vom 24.02.2012) enthält Vorgaben für die Zulassung von Deponien. Die Errichtung und der Betrieb einer Deponie sowie die wesentliche Änderung einer Deponie oder ihres Betriebes bedürfen (grundsätzlich) der Planfeststellung durch die zuständige Behörde. In dem Planfeststellungsverfahren ist eine Umweltverträglichkeitsprüfung durchzuführen (§ 35 Abs. 2 KrWG). Die Stilllegung einer Deponie und der Abschluss der Nachsorgephase richten sich nach § 40 KrWG.

In der Deponieverordnung (DepV, vom 27.04.2009) werden EU-Vorgaben umgesetzt (wie auch im KrWG) und die rechtlichen Vorgaben für Deponien, die sich vor allem an den Deponiebetreiber wenden, weiter konkretisiert. Die Anforderungen der Deponieverordnung gelten jedoch nicht für Deponien und Deponieabschnitte,

- auf denen die Stilllegungsphase vor dem 01. Januar 1997 begonnen hat,
- auf denen die Stilllegungsphase vor dem 16. Juli 2001 begonnen hat und für die zu diesem Zeitpunkt auch Festlegungen für die Stilllegung getroffen waren (Planfeststellung, Plangenehmigung, Anordnung),

- die am 16. Juli 2009 durch bestandskräftigen Bescheid endgültig stillgelegt waren.

Diese Deponien unterliegen aber weiterhin dem Abfallrecht.

Wenn der Deponierückbau vor dem Abschluss der Nachsorgephase beginnt, unterliegt er dem Abfall- bzw. Deponierecht. Inhaltliche Vorgaben an den Deponiebetreiber für die Stilllegungs- und Nachsorgephase werden in §§ 10 und 11 DepV geregelt. In diesen Paragraphen gibt es aber keine expliziten Regelungen für den Deponierückbau.

Nur in § 6 Abs. 6 Satz 2 Nr. 2 DepV sind konkrete Vorgaben für Abfälle, die aus dem Rückbau einer Deponie oder einer Altlast stammen und abgelagert werden sollen (siehe auch Ziffer 4).

Und im Anhang 5 Ziffer 10 Nr. 6 DepV ist der Rückbau als ein Kriterium für das Ende der Nachsorgephase angeführt.

### **Bodenschutzrecht**

Nach dem Ende der Nachsorgephase unterliegt die Deponie nicht mehr dem Abfallrecht, sondern dem Bodenschutzrecht, das dann für eventuelle Anordnungen der zuständigen Behörde herangezogen werden kann. § 40 Abs. 2 Satz 2 KrWG verweist hierzu auf die Vorschriften des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG).

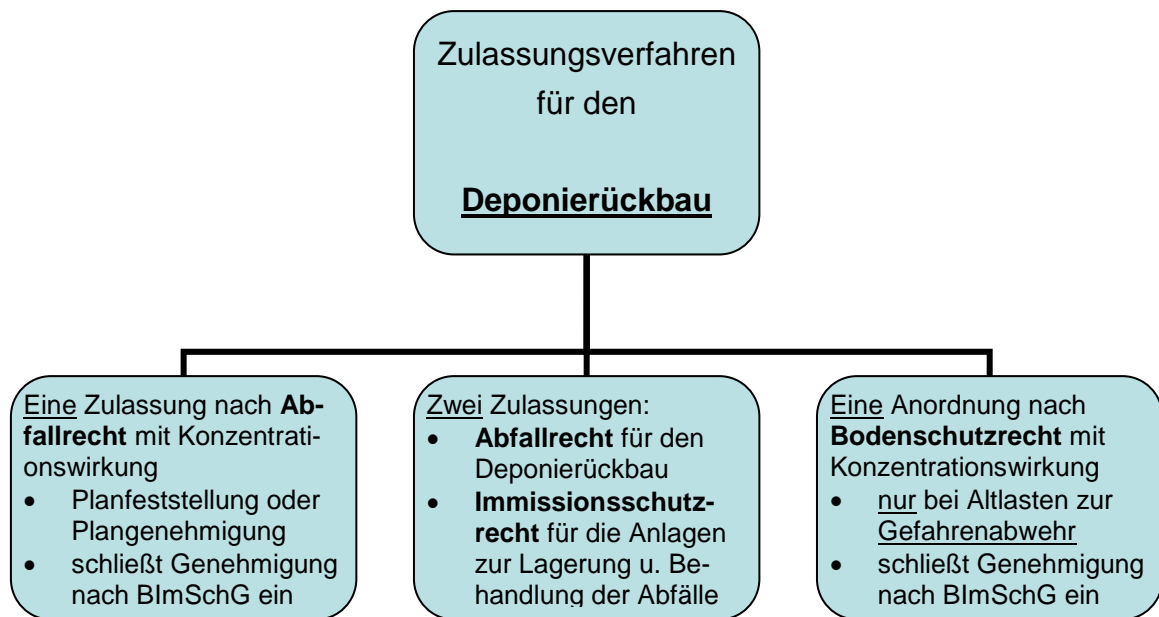
Altablagerungen im Sinne des § 2 Abs. 5 Nr. 1 BBodSchG sind stillgelegte Abfallbeseitigungsanlagen sowie sonstige Grundstücke, auf denen Abfälle behandelt, gelagert oder abgelagert worden sind.

Wenn eine Altablagerung aufgrund der Gefahrenabwehr zurückgebaut werden muss, dann ist dies eine Altlastensanierung, die durch eine Verfügung nach § 4 Abs. 3 BBodSchG und einen Sanierungsplan nach § 13 BBodSchG zu regeln ist.

Das Bodenschutzrecht regelt aber nur Fragen der Gefahrenabwehr und keine Fragen der Rohstoffrückgewinnung, die dann i. d. R. beim Deponierückbau relevant sind. Für die Anordnung eines Deponierückbaus ohne Gefahrentatbestand stellt das Bodenschutzrecht keine hinreichende Rechtsgrundlage dar. Es steht einem Deponierückbau, der dann nach Abfallrecht zu genehmigen wäre, aber auch nicht entgegen.

### **Bergrecht**

Im Bundesberggesetz geht es um das Aufsuchen, Gewinnen und Aufbereiten von Bodenschätzen. Dem Begriff der Bodenschätze (§ 3 Abs. 1 BBergG) unterliegen aber nur Rohstoffe, die in natürlichen Lagerstätten vorkommen. Die Abfälle einer Deponie erfüllen dieses Kriterium nicht, so dass die Anwendbarkeit des Bergrechts ausscheidet. /1/



### 3. Zulassungsverfahren – Rechtsgrundlagen, Verfahrensarten, Ablauf der Verfahren

#### 3.1 Planfeststellungsverfahren, Plangenehmigungsverfahren und Anzeigeverfahren nach KrWG

Der Deponierückbau oder teilweise Rückbau einer Deponie ist zulassungsbedürftig. Sobald eine größere Abfallmenge abgegraben wird, ist dies eine wesentliche Änderung der Deponie oder ihres Betriebes. Zur Zulassung des Vorhabens kann von der zuständigen Behörde auf Antrag ein Planfeststellungsverfahren oder ein Plangenehmigungsverfahren nach KrWG durchgeführt werden.

Wenn es sich um keine wesentliche Änderung einer Deponie handelt und keine nachteiligen Auswirkungen zu erwarten sind, reicht ggf. auch ein Anzeigeverfahren. Die Art des Genehmigungsverfahrens ist mit der zuständigen Behörde abzustimmen.

#### Planfeststellung und Plangenehmigung

Für die Errichtung und den Betrieb einer Deponie ist ein Planfeststellungsverfahren mit Umweltverträglichkeitsprüfung gemäß § 35 Abs. 2 KrWG erforderlich. Der Rückbau einer Deponie ist nicht explizit im Abfallrecht geregelt. Er ist aber in vielen technischen und organisatorischen Vorgehensweisen und in den Auswirkungen auf die Umwelt vergleichbar mit der Errichtung einer Deponie, so dass hier grundsätzlich auch ein Planfeststellungsverfahren zur Anwendung kommt. Die Durchführung des Planfeststellungsverfahrens richtet sich nach den Vorgaben des Verwaltungsverfahrensgesetzes. Die Entscheidung über den Antrag auf Planfeststellung ist im Internet zu veröffentlichen (§ 21 a DepV).

Die zuständige Behörde kann nach § 35 Abs. 3 KrWG auf Antrag oder von Amts wegen an Stelle eines Planfeststellungsbeschlusses eine Plangenehmigung erteilen, wenn

- die Errichtung und der Betrieb einer unbedeutenden Deponie beantragt werden, oder
- 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 (UVP) genanntes Schutzgut haben kann, oder
- 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 2 Jahren nach Inbetriebnahme der Anlage erteilt werden soll (bei gefährlichen Abfällen höchstens 1 Jahr).

Die zuständige Behörde soll ein Plangenehmigungsverfahren durchführen, wenn die wesentlichen Änderung keine erheblichen nachteiligen Auswirkungen auf ein Schutzgut hat und den Zweck verfolgt, eine wesentliche Verbesserung für diese Schutzgüter herbeizuführen.

Einschränkungen hinsichtlich der Durchführungen eines Plangenehmigungsverfahrens anstelle eines Planfeststellungsverfahrens nach § 35 Abs. 3 Satz 2 beziehen sich auf die Errichtung und den Betrieb von Deponien und nicht auf die wesentliche Änderung.

Gemäß § 36 Abs. 1 KrWG darf ein Planfeststellungsbeschluss oder eine Plangenehmigung nur erteilt werden, wenn sichergestellt ist, dass das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird, insbesondere keine Gefahren für die Schutzgüter, wie z. B. die Gesundheit der Menschen, Gewässer und Boden, Tiere und Pflanzen, hervorgerufen werden können. Schädliche Umweltverunreinigungen durch Luftverunreinigungen oder Lärm sind zu vermeiden. Weiterhin sind die Ziele der Raumordnung zu beachten und die öffentliche Sicherheit und Ordnung nicht zu stören. Vorsorge gegen die Beeinträchtigung der Schutzgüter ist durch betriebliche und bauliche Maßnahmen nach dem Stand der Technik zu treffen.

Im Gesetz zur Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) werden in § 2 Abs. 1 Satz 2 die Schutzgüter wie folgt konkretisiert: Menschen, Tiere und Pflanzen, biologische Vielfalt, Boden, Wasser, Luft, Klima und Landschaft, Kultur- und sonstige Sachgüter, einschließlich der jeweiligen Wechselwirkungen zwischen diesen Schutzgütern.

#### *Zweck des Vorhabens: Verbesserung für die Schutzgüter*

Bei einem Deponierückbau kann der Zweck der Maßnahme auch die Beseitigung oder Verringerung von Grundwasserbelastungen oder Gasemissionen sein. Dies ist z. B. auch bei einer teilweisen Umlagerung von Abfällen innerhalb einer Deponie gegeben, wenn die Abfälle von einem nicht abgedichteten Deponiebereich auf einen Bereich mit Basisabdichtung umgelagert werden.

Wenn die Maßnahme im Zielzustand eine wesentliche Verbesserung der Situation für die Schutzgüter nach UVP herbeiführt, liegt eine wesentliche Voraussetzung für die Durchführung eines Plangenehmigungsverfahrens anstatt eines Planfeststellungsverfahrens vor, auch wenn der Rückbau selbst für einige Jahre Auswirkungen auf die Schutzgüter haben kann./2/

### *Zweck des Vorhabens: Ressourcenrückgewinnung*

Der Zweck der Ressourcenrückgewinnung bzw. des Ressourcenschutzes ist nicht im KrWG verankert, so dass dies kein Grund für die Durchführung eines Plangenehmigungsverfahrens ist. In diesem Fall wird die zuständige Behörde allein aufgrund der zu erwartenden Auswirkungen des Deponierückbaus entscheiden, ob ein Planfeststellungs- oder Plangenehmigungsverfahren durchzuführen ist.

Dabei kann es für die Dauer des Deponierückbaus, der auch viele Jahre dauern kann, durchaus wieder neue erhebliche Emissionen und Auswirkungen auf die Schutzgüter geben. Dies können Emissionen bei der Abfallentnahme sein, wie Sickerwasser, Staub und Gas, Emissionen der Abfallaufbereitungsanlagen und der Abfalltransporte. In diesem Fall soll dann die zuständige Behörde i. d. R. ein Planfeststellungsverfahren mit UVP durchführen.

Die zuständige Behörde hat im Planfeststellungs- und Plangenehmigungsverfahren die Auswirkungen auf die Schutzgüter zu prüfen und abzuwägen. Wenn das Vorhaben genehmigungsfähig ist, sind dann diese Auswirkungen durch technische Maßnahmen zu minimieren und als Auflagen im Genehmigungsbescheid zu regeln.

### **Rechtswirkungen**

Die Planfeststellung einer Deponie ersetzt sämtliche nach anderen Rechtsvorschriften erforderlichen Genehmigungen und Erlaubnisse und Befreiungen. An die Stelle der sonstigen fachrechtlichen Genehmigungen (z. B. nach Baurecht, Wasserrecht, Naturschutzrecht) tritt der Planfeststellungsbeschluss. Dies gilt auch für die Plangenehmigung, die mit Ausnahme der enteignungsrechtlichen Vorwirkung die Rechtswirkungen der Planfeststellung hat.

Damit ist auch eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung bei der Zulassung wesentlicher Änderungen von Deponien sowohl im Wege der Planfeststellung als auch im Wege der Plangenehmigung entbehrlich.

In der Praxis dürften im Regelfall bei isolierter Betrachtung die Maßstäbe für das Erfordernis einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung und für das Erfordernis eines Planfeststellungsverfahrens nach § 35 Abs. 2 KrWG identisch sein. Das Erfordernis einer förmlichen immissionsschutzrechtlichen Genehmigung kann grundsätzlich als Indikator für das Erfordernis eines Planfeststellungsverfahrens nach § 35 Abs. 2 KrWG herangezogen werden.

Bei Bedarf können daher auch die für den Rückbau erforderlichen Genehmigungen nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) für die Anlagen zur Lagerung oder Behandlung von Abfällen mit der abfallrechtlichen Zulassung genehmigt werden. Denn sie stehen – für den Deponierückbau – in einem funktionalen oder betriebstechnischen Zusammenhang zur Deponie.

Wenn der betriebstechnische Zusammenhang der Anlagen mit der Deponie nicht gegeben ist, werden die Anlagen nach dem BImSchG genehmigt, falls sie in der 4. BImSchV als genehmigungsbedürftig benannt sind.

Deponiefremde Anlagen sind außerhalb des abfallrechtlichen Zulassungsverfahrens zu genehmigen.

### **Anzeige**

Wenn durch ein Vorhaben keine wesentliche Änderung der Deponie erfolgt und keine nachteiligen Auswirkungen zu erwarten sind, kann die Änderung auch durch eine Anzeige erfolgen. Für den Rückbau einer Deponie oder Teilen der Deponie ist ein Anzeigeverfahren nicht ausreichend. Die Anzeige wird nach § 35 Abs. 4 und 5 KrWG geregelt, welcher auf die Vorschriften des § 15 Abs. 1 Satz 1 bis 4 und Abs. 2 BImSchG verweist.

Beim Anzeigeverfahren muss der Träger des Vorhabens mindestens einen Monat vor der beabsichtigten Änderung eine schriftliche Anzeige bei der zuständigen Behörde einreichen. Auch im Anzeigeverfahren sind entsprechende Unterlagen, die die beabsichtigte Änderung beschreiben, der zuständigen Behörde vorzulegen.

### **3.2 Erforderliche Antragsunterlagen für das Zulassungsverfahren nach KrWG**

Welche Unterlagen für das Zulassungsverfahren erforderlich sind, erschließt sich zunächst aus § 19 DepV. Hier sind die erforderlichen Unterlagen für die Errichtung und den Betrieb einer Deponie aufgelistet, die teilweise auch für die Unterlagen zum Deponierückbau relevant sind. Gemäß § 19 Abs. 1 Satz 3 DepV gelten die Anforderungen auch für die wesentliche Änderung einer Deponie entsprechend beschränkt auf die die Änderung betreffenden Angaben. In jedem Fall sollte der Inhalt der Antragsunterlagen mit der zuständigen Behörde abgestimmt werden. Folgende Antragsunterlagen zum Deponierückbau werden empfohlen:

- Namen und Wohnsitz oder Sitz des Trägers des Vorhabens, des Betreibers und des Entwurfsverfassers,
- Angabe, ob eine Planfeststellung, eine Plangenehmigung bzw. eine Zulassung des vorzeitigen Beginns beantragt wird,
- Standort und Bezeichnung der Deponie, Kapazität der Deponie
- Begründung der Notwendigkeit der Maßnahme,
- Angaben zur Sicherheitsleistung,
- Gesamtdarstellung des geplanten Rückbaubetriebes mit Deponieabbau und Wiedereinbau,
- Erläuterung der zeitlichen Abfolge, wann welcher Deponiebereich abgebaut wird und in welchen Deponiebereich welches Material wieder eingebaut wird,
- Ggf. Ausführungen zum Bau einer neuen Abdichtung,

- Darlegung der zusätzlichen Belastungen der Schutzgüter (Welche Emissionen traten schon während des bisherigen Deponiebetriebs auf? Ggf. Bestimmung der Hintergrundbelastung für das Schutzgut Luft),
- Darstellung der Maßnahmen zur Minderung der Emissionen beim Rückbau, vor allem Maßnahmen zur Sickerwasserfassung und -ableitung während des Abgrabens und Maßnahmen zur Geruchs- und Staubminimierung,
- Verwertungs- und Entsorgungskonzept für die ausgebauten und abgetrennten Abfälle,
- Maßnahmen zum Arbeitsschutz.

### **3.3 Arbeitsschutz**

#### **3.3.1 Gesetze, Verordnungen und Technische Regeln**

Beim Deponierückbau treten für die Beschäftigten erhebliche Gefährdungen unterschiedlichster Art auf. Diese können z. B. von den eingesetzten technischen Arbeitsmitteln, von vorhandenen Gefahrstoffen oder von biologischen Arbeitsstoffen ausgehen.

Um geeignet auf diese Gefährdungen reagieren zu können, sind entsprechende Schritte vor Beginn der Arbeiten und während der Arbeiten durchzuführen.

Die Vorgehensweisen sind allgemein im Arbeitsschutzgesetz und daraus resultierenden Verordnungen, hier insbesondere in der Gefahrstoffverordnung und der Baustellenverordnung vorgegeben.

Ein wesentliches Instrument ist hierbei die Gefährdungsbeurteilung.

Für die geplanten Tätigkeiten im Zusammenhang mit dem Rückbau von Deponien besteht die Gefährdungsbeurteilung aus dem Arbeits- und Sicherheitsplan (SiGe-Plan) gemäß Baustellenverordnung, in dem der Sicherheits- und Gesundheitsschutzplan gemäß Gefahrstoffverordnung als wesentlicher Bestandteil enthalten ist.

Bei der Gefährdungsbeurteilung sind alle Einflussgrößen, die zu einer Gefährdung von Beschäftigten führen können, zu ermitteln und zu bewerten sowie auf dieser Grundlage und unter Beachtung der Gefahrstoffverordnung und Baustellenverordnung angemessene Schutzmaßnahmen festzulegen und einzuhalten.

Für die Einhaltung hat der Auftraggeber einen fachkundigen Koordinator zu bestellen.

Diese Vorgaben und Anforderungen werden für die Praxis durch die TRGS 524 „Technische Regeln für Gefahrstoffe, Schutzmaßnahmen bei Tätigkeiten in kontaminierten Bereichen“ und die BGR 128 „Kontaminierte Bereiche“ konkretisiert.

Die TRGS 524 beschreibt detailliert die Methodik der Gefährdungsbeurteilung konform mit dem Arbeitsschutzgesetz und der Gefahrstoffverordnung und Baustellenverordnung und verankert die Arbeitgeberpflichten in einer staatlichen Regel. Die Berücksichtigung bzw. Einhaltung einer staatlichen Regel löst Vermutungswirkung aus, es besteht Rechtssicherheit, für die die entsprechend dieser Regel vorgehen.



Die BGR 128 definiert besondere Anforderungen an die ausführenden Unternehmen, zum Beispiel die Anzeigepflicht der Arbeiten und regelt die berufsgenossenschaftliche Anerkennung von Lehrgängen.

Gemäß der TRGS 524 sind solche Personen als fachkundig anzusehen, die eine Qualifikation entsprechend der Anlage 2 nachweisen können. Die dort definierten Anforderungen an die Qualifikation entsprechen denen der in der BGR 128 beschriebenen Lehrgangsinhalten.

Mit den Arbeiten darf erst begonnen werden, wenn die Gefährdungsbeurteilung vorliegt.

### **Wesentliche Gesetze und Verordnungen**

- Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG
- Biostoffverordnung – BioStoffV
- Gefahrstoffverordnung – GefStoffV
- Baustellenverordnung – BaustellV

### **Wesentliche Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS)**

- TRGS 524 – Technische Regeln für Gefahrstoffe, Schutzmaßnahmen bei Tätigkeiten in kontaminierten Bereichen

### **Wesentliche Vorschriften und Regeln der Unfallversicherungsträger / Berufsgenossenschaft**

- BGR 127 / GUV-R 127 – Regeln für Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit auf und in Deponien
- BGR 128 – Kontaminierte Bereiche

#### **3.3.2 Pflichten des Auftraggebers**

Der Auftraggeber hat nach Baustellenverordnung die Pflicht einen Arbeits- und Sicherheitsplan von einer fachkundigen Person erstellen und dokumentieren zu lassen. Dieser wird dem Auftragnehmer übergeben, damit er seinen Arbeitsschutzpflichten als Arbeitgeber nachkommen kann.

Die TRGS 524 beschreibt hierbei eine systematische Herangehensweise zur Gefährdungsermittlung und Gefährdungsbeurteilung und formuliert Standards zur Fachkunde und zu den Verantwortlichkeiten des Auftraggebers/Auftragnehmers. Vor Beginn des Rückbaus sind vom Auftraggeber Vorerkundungen über mögliche Abfallinhaltsstoffe und vorhandene Gefahrstoffe zu ermitteln. (siehe TRGS 524 3.2 Vorwegmaßnahmen)

des Auftraggebers in der Planungsphase und 3.2.1 Vorerkundung). Bei einem geordneten Deponiebetrieb können diese Informationen über vorhandene Abfallstatistiken, Abfallkataster oder Probebohrungen erfolgen.

Nach TRGS 524 bestehen die Gefährdungsbeurteilung bzw. die Inhalte des Arbeits- und Sicherheitsplanes aus folgenden Schritten:

1. Informationsermittlung zu
  - a) Art und Konzentration der Gefahrstoffe,
  - b) den Eigenschaften der Gefahrstoffe,
  - c) den Arbeitsbereichen, in denen Tätigkeiten nach Nummer 2.1 TRGS 524 ausgeführt werden sollen,
  - d) den verfügbaren Arbeitsverfahren und den daraus resultierenden Arbeitsabläufen, Arbeitsschritten und Einzeltätigkeiten sowie
  - e) den arbeitsbereichs- und tätigkeitsbedingten Faktoren der Gefährdung.
2. Abschätzung der zu erwartenden Exposition und Gefährdung durch
  - a) inhalative, orale oder dermale Gefahrstoffaufnahme und
  - b) Brand- und Explosionsgefahren für die verfügbaren Arbeitsverfahren und unter Berücksichtigung der betreffenden arbeitsbereichs- und tätigkeitsbezogenen Faktoren
3. Auswahl des Arbeitsverfahrens mit der geringsten Gefährdung.
4. Auswahl und Festlegung der Maßnahmen.
5. Dokumentation der Gefährdungsbeurteilung und der Maßnahmen sowie
6. Kontrolle und Bewertung der Maßnahmen bzgl. ihrer Wirksamkeit.

(Siehe 4.1 und Anlage 1 „Ablaufschema zu den wesentlichen Schritten der Gefährdungsbeurteilung“ der TRGS 524)

Die Ergebnisse und vorgesehenen Schutzmaßnahmen sind nach TRGS 524 in Form eines Arbeits- und Sicherheitsplan zu dokumentieren.

Der Arbeits- und Sicherheitsplan wird zu einem wesentlichen Bestandteil des Sicherheits- und Gesundheitsschutzplans (SiGe-Plan) gemäß Baustellenverordnung. Der SiGe-Plan entspricht inhaltlich dem Arbeits- und Sicherheitsplan gemäß BGR 128, der für kontaminierte Bereiche anzuwenden ist. Die Erstellung obliegt dem Auftraggeber.

### **3.3.3 Pflichten des Auftragnehmers**

Der Auftragnehmer, der die Arbeit ausführt, legt vor Aufnahme der Tätigkeit auf der Grundlage der vom Auftraggeber erstellten Dokumentation die unternehmensspezifischen technischen, organisatorischen und persönlichen Schutzmaßnahmen einschließlich eines Konzeptes zur Kontrolle der Einhaltung der Maßnahmen in seiner Gefährdungsbeurteilung fest.

Hierbei hat er insbesondere die arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchungen, Unterweisungen, Betriebsanweisungen und die sich daraus ergebende konkrete persönliche Schutzausrüstung sowie die fachkundige Bauleitung und Aufsicht festzulegen.

### 3.4 Genehmigungs- und Anzeigeverfahren nach BImSchG für Anlagen zur Lagerung oder Behandlung von Abfällen

Der beim Deponierückbau abgegrabene Abfall gelangt anschließend in Anlagen zur Lagerung und Behandlung von Abfällen, für die ein Genehmigungsverfahren nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) erforderlich sein kann. Entweder diese Genehmigungen werden im Rahmen der Konzentrationswirkung des abfallrechtlichen Planfeststellungs- oder Plangenehmigungsverfahrens für den Deponierückbau ebenfalls erteilt (was die Regel ist) oder es wird ein gesondertes Verfahren nach dem BImSchG durchgeführt, wenn die Anlage keinen betriebstechnischen Zusammenhang zur Deponie hat.

Die Art des Verfahrens, d. h. ob gemäß § 10 BImSchG ein **Genehmigungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung** oder ein **vereinfachtes Verfahren** nach § 19 BImSchG (ohne Auslegung des Antrags und Erörterungstermin) durchzuführen ist, hängt von der Größe der Anlage und von der Art der Abfälle ab. Dies ist in der 4. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (4. BImSchV) geregelt:

V = Vereinfachtes Verfahren

G = Verfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung

Anlagen, die Art. 10 Richtlinie RL 2010/75/EU unterliegen (IED), werden im Anhang zur 4. BImSchV mit dem Buchstaben „E“ gekennzeichnet. Beim Deponierückbau werden die Abfälle i. d. R. jeweils kürzer als ein Jahr gelagert, d. h. die Verfahrensart ergibt sich aus Nr. 8.12 der 4. BImSchV (zeitweilige Lagerung von Abfällen im Sinne der 4. BImSchV). Bei einer länger dauernden Lagerung der Abfälle ist eine Genehmigung nach Nr. 8.14 der 4. BImSchV erforderlich (siehe 4. BImSchV).

Für Anlagen nach Nr. 8 des Anhangs der 4. BImSchV (Verwertung und Beseitigung von Abfällen und sonstigen Stoffen) gilt die Genehmigungspflicht auch dann, wenn sie weniger als ein Jahr betrieben werden. Dies gilt nicht für die Behandlung am Entstehungsort (Ausnahme gemäß §1 Abs. 1 Satz 2 der 4. BImSchV). Eine zusätzliche Ausnahme von der Genehmigungspflicht für die zeitweilige Lagerung bis zum Einsammeln auf dem Gelände der Entstehung der Abfälle enthält Nr. 8.12 des Anhangs zur 4. BImSchV. Zum Entstehungsort oder zum Gelände der Entstehung der Abfälle dürfte in der Regel zumindest das Deponiegrundstück zählen.

Zur Beantragung einer Genehmigung ist ein schriftlicher Antrag erforderlich, dem Zeichnungen, Erläuterungen und Unterlagen beizufügen sind. Ist beabsichtigt, eine Anlage nach IED-Richtlinie zu betreiben, in der relevante gefährliche Stoffe verwendet, erzeugt oder freigesetzt werden, hat der Antragsteller, zusammen mit den vorgenannten Unterlagen, gemäß §10 Abs. (1a) BImSchG einen Ausgangszustandsbericht (AZB)

vorzulegen. Die IED-Richtlinie nimmt bezüglich der Einstufung von Stoffen Bezug auf die CLP-Verordnung (Classifikation, Labelling, Packaging), die Abfälle von ihrem Geltungsbereich ausschließt.

Dennoch kann auch für Abfallanlagen eine AZB-Pflicht bestehen (mit Ausnahme von Deponien), wenn die Kriterien IED-Anlage mit relevanten gefährlichen Stoffen (außer Abfällen) und ein Verschmutzungsrisiko gegeben sind, z. B. durch den Einsatz anderer Stoffe (außer Abfällen).

Nach Auffassung des BMUB ist für Deponien kein AZB erforderlich, da die Anforderungen an die Erstellung eines AZB bereits vom Deponierecht umfasst werden. Außerdem ist die Deponie – im Gegensatz zu anderen Anlagen - ein auf Dauer angelegtes Bauwerk zur dauerhaften gemeinwohlverträglichen Ablagerung von Abfällen, so dass es keine Rückführungspflicht gibt.

Die Genehmigung ist gemäß § 6 BlmSchG zu erteilen, wenn insbesondere die Betreiberpflichten nach § 5 BlmSchG sowie die Pflichten aufgrund von § 7 BlmSchG erlassenen Rechtsverordnungen erfüllt werden und andere öffentlich rechtliche Vorschriften der Errichtung und dem Betrieb der Anlage nicht entgegenstehen.

Änderungen genehmigungsbedürftiger Anlagen, die sich auf die Schutzgüter (positiv oder negativ) auswirken können, sind nach § 15 BlmSchG in einem **Anzeigeverfahren** zu regeln. Die Änderung ist der zuständigen Behörde mindestens einen Monat, bevor mit der Änderung begonnen werden soll, schriftlich anzuzeigen. Die Behörde entscheidet innerhalb eines Monats, ob ggf. ein Genehmigungsverfahren erforderlich ist.

Für die **wesentliche Änderung** einer genehmigungsbedürftigen Anlage ist eine **Genehmigung** nach § 16 BlmSchG erforderlich. Eine Änderung ist wesentlich, wenn durch sie nachteilige Auswirkungen im Sinne von § 16 BlmSchG hervorgerufen werden können oder durch die Änderung bestimmte Kapazitätsschwellen überschritten werden.

Zur Erfüllung der sich aus dem BlmSchG und der aufgrund des Gesetzes erlassenen Rechtsverordnung ergebenden Pflichten können nach § 17 BlmSchG nachträgliche Anordnungen (Ordnungsverfügungen) erlassen werden.

### **BVT-Schlussfolgerungen**

Eine BVT-Schlussfolgerung ist ein Dokument der Europäischen Kommission, das die beste verfügbare Technik zur Emissionsminderung in einer Branche beschreibt. Die Dokumente entstehen als Schlussfolgerungen aus den wesentlich umfangreicheren BVT-Merkblättern der Europäischen Kommission.

Im BlmSchG ist die Umsetzung der BVT-Schlussfolgerungen in § 7 Abs. 1a geregelt. Danach muss die Bundesregierung innerhalb eines Jahres ab Veröffentlichung der BVT-Schlussfolgerungen eine Überprüfung und ggf. Änderung der Rechtsverordnung

vornehmen. Innerhalb von vier Jahren nach Veröffentlichung der BVT-Schlussfolgerungen sind dann durch die Anlagen die Emissionsgrenzwerte der Rechtsverordnung einzuhalten.

Hierzu hat die zuständige Behörde eine Überprüfung und ggf. erforderliche Anpassung der Genehmigung vorzunehmen und sicherzustellen, dass die Anlage die entsprechenden Anforderungen auch einhält (Überwachung gemäß § 52 Abs. 1 BImSchG), zusätzliche Anforderungen enthält § 12 Abs. 1a BImSchG.

Bislang sind erst für wenige Branchen BVT-Schlussfolgerungen veröffentlicht worden. Eine Auflistung ist einsehbar unter: <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/>. Für die Branche „Abfallbehandlung“ sind die Arbeiten zu den BVT-Schlussfolgerungen 2013 begonnen worden.

### **3.5 Erforderliche Antragsunterlagen für das Genehmigungsverfahren nach BImSchG**

In der 9. BImSchV (Verordnung über das Genehmigungsverfahren) ist in den §§ 3, 4, 4a bis 4e geregelt, welche Antragsunterlagen zur Genehmigung einzureichen sind:

- § 3: Antragsinhalt (Name/Wohnsitz d. Antragstellers, Art der beantragten Genehmigung, Standort der Anlage, Art und Umfang der Anlage, Betriebsbeginn)
- § 4: Antragsunterlagen
- § 4a: Angaben zur Anlage und zum Anlagenbetrieb
- § 4b: Angaben zu den Schutzmaßnahmen
- § 4c: Plan zur Behandlung der Abfälle
- § 4d: Angaben zur Energieeffizienz
- § 4e: Zusätzliche Angaben zur Prüfung der Umweltverträglichkeit (bei UVP-pflichtigen Vorhaben).
  
- Wenn UVP erforderlich, ist sie Teil des Genehmigungsverfahrens (§2(2)), UVP-Pflicht folgt insbesondere aus UVPG Anlage 1
- Hinsichtlich der Durchführung einer UVP ist die 9. BImSchV vorrangig.

Bei der Prüfung der Genehmigungsvoraussetzungen werden gemäß § 5 BImSchG die Pflichten der Betreiber genehmigungsbedürftiger Anlagen geprüft. Die Anlagen sind so zu errichten und zu betreiben, dass

- schädliche Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft nicht hervorgerufen werden können;
- Vorsorge getroffen wird, um solche Auswirkungen zu vermeiden, insbesondere durch die dem Stand der Technik entsprechenden Maßnahmen;

- Abfälle vermieden werden, nicht vermeidbare Abfälle sind ordnungsgemäß und schadlos zu verwerten; die Verwertung und Beseitigung von Abfällen, auch nach Betriebseinstellung, erfolgt nach den Vorschriften des Kreislaufwirtschaftsgesetzes;
- Energie sparsam und effizient verwendet wird.

### 3.6 Anordnungen (Sanierungsplan) nach BBodSchG

Unterliegt die Deponie als Altlast (Altablagerung) dem Bodenschutzrecht (siehe S. 167), kann ein (ggf. vollständiger) Deponierückbau im Rahmen der Gefahrenabwehr erfolgen. Wenn die abschließende Gefährdungsabschätzung zur Altlast ergibt, dass Sanierungsmaßnahmen notwendig sind, wird die Durchführung einer Sanierungsuntersuchung und die Vorlage eines Sanierungsplans (§ 13 BBodSchG) notwendig.

Gemäß § 13 Abs. 1 BBodSchG soll die zuständige Behörde bei Altlasten, von denen in besonderem Maße schädliche Bodenveränderungen oder sonstige Gefahren für den Einzelnen oder die Allgemeinheit ausgehen, von einem zur Sanierung Verpflichteten die notwendigen Sanierungsuntersuchungen und die Vorlage eines Sanierungsplans verlangen.

Die Anforderungen an eine Sanierungsuntersuchung und einen Sanierungsplan ergeben sich aus § 6 und Anhang 3 BBodSchV.

Ziel der Sanierungsuntersuchung ist es, einzelfallbezogene Vorschläge für wirksame Maßnahmen zu erarbeiten. Die Sanierungsuntersuchung würde bei einem Deponierückbau u. a. folgende Aufgaben umfassen:

- Standortuntersuchungen,
- Sanierungsziele (*Entscheidung der Behörde*),
- Auswahl geeigneter Sanierungstechniken (z. B. vollständiger Deponierückbau), Sanierungsszenarien,
- Arbeitsschutz,
- Wirkungskdauer der Maßnahmen und deren Überwachungsmöglichkeiten,
- erforderliche Zulassungen,
- Entstehung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen,
- Nachsorgeerfordernis,
- Nutzen-Kosten-Betrachtung.

Der Sanierungsplan ist eine prüffähige Darstellung der Maßnahmen. Die Inhalte des Sanierungsplans sind im Überblick:

- Ausgangslage (Zusammenfassung der Gefährdungsabschätzung und Sanierungsuntersuchungen),

- Sanierungsziele und durchzuführende Maßnahmen, Nachweis ihrer Eignung und Auswirkungen auf die Umwelt
- erforderliche, behördliche Zulassungen
- Eigenkontrollmaßnahmen zur Überprüfung der Ausführung und Wirksamkeit der Maßnahmen und im Rahmen der Nachsorge,
- Zeitplan und voraussichtliche Kosten.

Die zuständige Behörde kann den Sanierungsplan, auch unter Abänderungen oder mit Nebenbestimmungen, für verbindlich erklären. Ein für verbindlich erklärter Sanierungsplan hat Konzentrationswirkung, d. h. er schließt andere die Sanierung betreffende behördliche Entscheidungen mit ein (mit Ausnahme der Umweltverträglichkeitsprüfung), soweit sie im Einvernehmen mit der zuständigen Behörde erlassen wurden (§ 13 Abs. 6 BBodSchG).

Die zuständige Behörde kann den Sanierungsplan unter bestimmten Voraussetzungen auch selbst erstellen oder ergänzen oder durch einen Sachverständigen erstellen lassen (§ 14 BBodSchG).

#### **4. Rechtliche Vorgaben für den Wiedereinbau**

##### **Abfallrecht**

Wenn bei einem Deponierückbau ein Teil der Abfälle nicht verwertet werden kann, sind diese Abfälle dann ordnungsgemäß zu entsorgen. Neben einer Entsorgung in einer anderen Entsorgungsanlage (z. B. Müllverbrennungsanlage, Mechanisch-Biologische Behandlungsanlage, andere Deponie), besteht ggf. bei einem teilweisen Deponierückbau auch die Möglichkeit, den Abfall auf derselben Deponie wieder abzulagern. Für den Wiedereinbau gelten die aktuellen Vorgaben der Deponieverordnung.

In § 6 in Verbindung mit Anhang 3 DepV sind die Voraussetzungen für die Ablagerung auf einer Deponie geregelt. Danach gibt es für Abfälle, die aus dem Rückbau einer Deponie oder Altlast stammen, besondere Regelungen (**§ 6 Abs. 6 Satz 2 Nr. 2 DepV**). Diese Abfälle dürfen, mit Zustimmung der zuständigen Behörde, auch bei Überschreitung einzelner Zuordnungswerte, insbesondere des TOC und des Glühverlustes, abgelagert werden, soweit vorher

- eine möglichst weitgehende Aussortierung organischer Anteile erfolgt,
- die heizwertreichen Abfallanteile vor der Ablagerung weitgehend abgetrennt werden,
- das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird.

##### **Bodenschutzrecht**

Bei einer Altlastensanierung kann im Rahmen des Sanierungsplans und innerhalb der Fläche des Sanierungsplans Bodenmaterial umgelagert bzw. wiedereingebaut werden.

Gemäß § 13 Abs. 5 BBodSchG entfällt bei entnommenem Bodenmaterial, das im Bereich der von der Altlastensanierung betroffenen Fläche wieder eingebracht werden soll, der Anlagenbenutzungszwang des § 28 Abs. 1 KrWG, wenn durch einen für verbindlich erklärten Sanierungsplan oder eine Anordnung sichergestellt ist, dass das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird.

Kontaminierter Boden von Altlasten ist i. d. R. als Abfall zur Beseitigung einzustufen. Bei der Umlagerung bzw. dem Wiedereinbau sind als Sanierungsziel gemäß § 2 Abs. 7 Nr. 2 BBodSchG Sicherungsmaßnahmen zu ergreifen, „die eine Ausbreitung der Schadstoffe langfristig verhindern oder vermindern“.

Soweit im Rahmen einer Sanierungsmaßnahme Abfälle zur Verwertung auftreten, hat nach § 7 Abs. 2 Satz 2 KrWG die Verwertung Vorrang vor der Beseitigung. Zur Verwertung kommt bei der Altlastensanierung grundsätzlich auch ein Wiedereinbau im Bereich der von der Sanierung betroffenen Fläche in Betracht. Die Verwertung muss nach § 7 Abs. 3 KrWG ordnungsgemäß und schadlos erfolgen. Werden die durch den Sanierungsplan festgelegten Sanierungsziele eingehalten, so kann davon ausgegangen werden, dass der Wiedereinbau von Bodenmaterial im Bereich eines Sanierungsplans ordnungsgemäß und schadlos im Sinne von § 7 Abs. 3 KrWG erfolgt.

Die Befreiung nach § 13 Abs. 5 BBodSchG vom Anlagenbenutzungszwang betrifft lediglich entnommenes Bodenmaterial, das in begrenztem Maße Verunreinigungen mit anderen Abfällen aufweisen darf. Andere, nicht mit dem Boden verbundene Abfälle sind von dieser Privilegierung nicht erfasst.

Anm.: Zweck der Befreiung vom Anlagenbenutzungszwang ist die Schaffung von Rechtssicherheit und Verfahrensvereinfachung bei der Altlastensanierung. Eine Umgehung des grundsätzlich geltenden Anlagenbenutzungszwangs ist durch fachlich sinnvolle Kriterien für die Sanierungsplanung zu vermeiden.

## **5. Sicherheitsleistung, Rückstellung, Gebühren**

### **Sicherheitsleistung**

Gemäß § 18 Abs. 1 DepV besteht die generelle Pflicht zur Leistung von Sicherheiten durch den Deponiebetreiber für die Erfüllung von Inhaltsbestimmungen, Auflagen und Bedingungen aus dem Planfeststellungsbeschluss oder der Plangenehmigung. Die Sicherheitsleistung ist nach Art und Umfang gemäß § 18 Abs. 2 DepV von der Behörde festzusetzen. Ein Absehen von einer Sicherheitsleistung ist nur für die in § 18 Abs. 4 DepV bestimmten Fälle öffentlich-rechtlicher Beteiligung vorgesehen.

Bei der Bemessung der Sicherheitsleistung ist bei Deponien der Klassen I bis IV von einem *Nachsorgezeitraum von mindestens 30 Jahren* auszugehen, bei Deponien der Klasse 0 von 10 Jahren.

Bei einem Deponierückbau entfallen die Kosten der Stilllegungs- und Nachsorgephase entweder ganz oder teilweise. Dementsprechend kann bei kompletter Räumung des Standortes die Sicherheitsleistung dann entfallen oder sie wird entsprechend reduziert. Auch die betrieblichen Rückstellungen können dann entsprechend reduziert werden.

Die durch den Deponierückbau eingesparten Aufwendungen aus ordnungsgemäß gebildete Rückstellungen und die Einsparung der Sicherheitsleistung reichen in den meis-



ten Fällen nicht, um die Kosten des Deponierückbaus vollständig zu decken, auch nicht unter Berücksichtigung der Erlöse aus Wertstoffen und geräumten Flächen. /2/

Die Wirtschaftlichkeit kann jedoch gegeben sein, wenn noch weitere Gründe für den Deponierückbau maßgeblich sind, wie z. B. die Sanierung eines Grundwasserschadens oder die Erschließung eines teuren Grundstücks.

### **Rückstellung**

Die erforderlichen Stilllegungs- und Nachsorgeaufwendungen ergeben sich aus dem deponiespezifisch festgelegten technischen Maßnahmenkatalog nach Beendigung der Abfallablagerung. Nach Beendigung der Abfallablagerung beginnt die Stilllegungs- und Nachsorgephase der einzelnen Ablagerungsbereiche bzw. der Gesamtdeponie. Die Phasen werden unter Berücksichtigung der örtlichen Randbedingungen und in Anlehnung an die Definition der Deponieverordnung wie folgt beschrieben:

### **Stilllegungsphase**

Zeitraum vom Ende der Abfallablagerung der Deponie oder eines Deponieabschnitts bis zur endgültigen Stilllegung der Deponie oder eines Deponieabschnittes nach § 40 Abs. 3 KrWG i. V. mit § 10 DepV. In der Stilllegungsphase hat der Deponiebetreiber unverzüglich alle erforderlichen Maßnahmen durchzuführen, um eine Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit zu verhindern. Diese Phase umfasst somit insbesondere die Beendigung der Ablagerung und alle erforderlichen Maßnahmen zur Errichtung des Oberflächenabdichtungssystems, um Beeinträchtigungen des Wohles der Allgemeinheit zu verhindern.

In der Stilllegungsphase sind im Wesentlichen folgende Maßnahmen durchzuführen:

- Aufbringen der temporären Oberflächenabdeckung
- Sickerwasserfassung und –behandlung
- Grundwasserüberwachung
- Oberflächenwassermanagement
- Erneuerungsmaßnahmen von erforderlichen technischen Einrichtungen
- Deponiegasfassung und –behandlung
- Oberflächenabdichtung und Durchführung der Rekultivierungsmaßnahmen
- Rückbau entbehrlicher Anlagen
- Reparatur, Wartung, Unterhaltung, Kontrolle von Anlagen und Einrichtungen
- Sonstige Kontroll- und Überwachungsmaßnahmen, Dokumentation.

### **Nachsorgephase**

Zeitraum nach der endgültigen Stilllegung der Deponie oder eines Deponieabschnittes bis zu dem Zeitpunkt, zu dem die zuständige Behörde nach § 40 Abs. 5 des KrWG i. V. mit § 11 DepV und Anhang 5 Nr. 10 DepV den Abschluss der Nachsorge der Deponie

feststellt. In der Nachsorgephase hat der Deponiebetreiber alle Maßnahmen durchzuführen, die zur Abwehr von Gefahren und zur Vermeidung von Beeinträchtigungen des Wohls der Allgemeinheit erforderlich sind. Hierzu gehören insbesondere die betrieblichen Maßnahmen, wie z. B. die Sickerwasserbehandlung, die betrieblichen Maßnahmen zur Wartung und Kontrolle der Deponie sowie die notwendigen Erhaltungsmaßnahmen an den verschiedenen technischen Einrichtungen der Deponie.

Nach § 12 der DepV sind folgende wesentliche Maßnahmen zur Kontrolle, Verminderung und Vermeidung von Emissionen, Immissionen, Belästigungen und Gefährdungen in der Nachsorgephase durchzuführen:

- Sickerwasserfassung und –behandlung
- Grundwasserüberwachung
- Oberflächenwassermanagement
- Erneuerungsmaßnahmen von erforderlichen technischen Einrichtungen
- Restentgasungsmaßnahmen
- Rückbau entbehrlicher Anlagen
- Reparatur, Wartung, Unterhaltung, Kontrolle von Anlagen und Einrichtungen
- Mess- und Kontrollprogramme (Meteorologische Daten, Emissionsdaten, Grundwasserdaten, Daten zum Deponiekörper (Setzungsmessungen, Überwachen des Zustandes der Abdichtungssysteme)
- Dokumentation.

### **Bewertung der Rückstellung**

Die Höhe der Rückstellungen und dessen Bewertung ergeben sich aus den verschiedenen rechtlichen Grundlagen, insbesondere der Berechnungsmethodik. Diese führen zu unterschiedlichen Rückstellungshöhen, wobei folgende Grundlagen maßgebend sind:

- betriebswirtschaftliche,
- steuerrechtliche und handelsrechtliche.

In der Praxis führen diese zu unterschiedlichen Ergebnissen.

- Betriebswirtschaftliche Bewertung von Rückstellungen erfolgt unter Berücksichtigung eines festzulegenden Zinssatzes und einer prognostizierten Preissteigerungsrate. Der Rückstellungsbetrag zum Zeitpunkt des Ablagerungsendes bildet finanzmathematisch den Barwert der Kosten im Stilllegungs- und Nachsorgezeitraum. Dieser Wert sollte den möglichst realitätsnah abgeschätzten Rückstellungsbetrag, der eine Verzinsung des Kapitals im Stilllegungs-/ Nachsorgezeitraum berücksichtigt, widerspiegeln.
- Für die Erstellung der Steuerbilanzen sind steuerrechtliche Grundlagen zu beachten. Im Hinblick auf die Rückstellungsbildung ist § 5 Abs. 1 EStG maßgebend. Nach § 6 Abs. 1 Nr. 3a Buchstabe e) EStG sind Rückstellungen für Verpflichtungen in der Steuerbilanz mit einem Zinssatz von 5,5 % abzuzinsen, es sei denn, mit der Erfüllung der Verpflichtung wurde bereits begonnen, dann sind gem. § 6 Abs. 3 EStG

ausgenommen von der Abzinsung, Verbindlichkeiten, deren Laufzeit am Bilanzstichtag weniger als 12 Monate beträgt und Verbindlichkeiten, die verzinslich sind oder auf einer Auszahlung oder Vorleistung beruhen. Der Abzinsungszeitraum erstreckt sich vom jeweiligen Bilanzstichtag bis zum Beginn der Erfüllung der Sachleistungsverpflichtung (z. B. Beginn des Aufbringens der Oberflächenabdichtung einer Deponie oder eines Ablagerungsabschnittes). Einzelheiten ergeben sich aus dem Schreiben des Bundesministeriums der Finanzen vom 25.07.2005, IV B 2-S 2137-35/05, BStBl. I 2005, 826.

Zentrale Vorschriften für die Berechnung der handelsrechtlichen Deponierückstellungen sind § 249 und § 253 HGB–Handelsgesetzbuch. Nach § 249 HGB lassen sich Verbindlichkeits-, Drohverlust- und Aufwandsrückstellungen unterscheiden. Rückstellungen für die Deponienachsorge sind sogenannte Rückstellungen für ungewisse Verbindlichkeiten gem. § 249 Abs. 1, S. 1 HGB. Diese sind am Bilanzstichtag entweder auf privatrechtlicher Basis (Leistungs- oder Erfüllungsrückstand) oder auf öffentlich-rechtlicher Basis (Mindestkonkretisierung durch Verwaltungsakt) oder auf Grund faktischer Außenverpflichtung gegeben. Voraussetzung nach ständiger Rechtsprechung des Bundesfinanzhofs (BFH) ist zum einen, das Bestehen eines dem Betrag nach nachgewiesenen Grund nach der bestehenden Verbindlichkeit oder die hinreichende Wahrscheinlichkeit des zukünftigen Entstehens einer ggf. ihrer Höhe nach noch nicht nachgewiesener Verbindlichkeit.

Im Rechtsregime des Handelsrechts ist das Bilanzrechtsmodernisierungsgesetz (BilMoG vom 25. Mai 2009) zu berücksichtigen. BilMoG wirkt sich erheblich auf die handelsrechtliche Bilanzierung von Rückstellungen aus. Ein wesentlicher Grund ist, dass die zukünftige Verpflichtung unter Berücksichtigung zukünftiger Preis- und Kostensteigerungen in Verbindung mit einer erforderlichen Abzinsung des voraussichtlichen Erfüllungsbetrages zu bilden ist. D. h. es besteht ein Diskontierungsgebot. In der Umsetzung heißt das, dass Rückstellungen mit einer Restlaufzeit von mehr als einem Jahr mit einem festzusetzenden Marktzins abzuzinsen sind. Die Diskontierung soll dabei auf Grundlage des durchschnittlichen Marktzinses erfolgen, wobei der Durchschnitt über die letzten sieben Geschäftsjahre zu bilden ist, um Zufallsschwankungen in der Zinsentwicklung auszugleichen. Die Deutsche Bundesbank ermittelt dazu mit zwei Nachkommastellen für die Restlaufzeiten der Deponie von einem Jahr bis 50 Jahre den durchschnittlichen Marktzins und gibt diesen monatlich bekannt.

### **Gebühren**

Nach § 9 Abs. 2 Landesabfallgesetz Nordrhein-Westfalen (LAbfG) gehören zu den ansatzfähigen Kosten bei der Erhebung von Benutzungsgebühren für eine Abfallentsorgungseinrichtung alle Aufwendungen, die den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern dadurch entstehen, dass diese abfallwirtschaftliche Aufgaben unter Beachtung von § 1 Abs. 3 S. 2 LAbfG (Ziele des Gesetzes wie z. B. die Wiederverwendung von Stoffen und Produkten) wahrnehmen.

Nach der Rechtsprechung des OVG Münster (U. v. 24.11.1999 – 9 A 5913/96) ist es nicht zu beanstanden z. B. die Kosten für die Untersuchung und/oder Optimierung be-

trieblicher Anlagen und Abläufe über die Abfallentsorgungsgebühren zu finanzieren. Die Vermeidung künftiger Abfallentsorgungskosten sowie die Senkung von Nachsorgekosten lassen sich unter die durch die vorgenannte Entscheidung des OVG aufgeführten Maßnahmen einordnen. Somit können die Kosten des Deponierückbaus, auch des Rückbaus zu Forschungszwecken, wenn es zur Reduzierung der Kosten dient, über die Abfallentsorgungsgebühren gedeckt werden. /10/

## 6. Empfehlungen für künftige rechtliche Regelungen

Der Deponierückbau sollte im Kreislaufwirtschafts- und Deponierecht verankert werden. Hierzu könnte man den zeitlichen Anwendungsbereich des Deponierechts über das Ende der Nachsorgephase hinaus verlängern. Damit hätte man eine Rechtsgrundlage für den Deponierückbau zum Zwecke der Rückgewinnung von Ressourcen nach dem Ende der Nachsorgephase. Eine Überschneidung mit dem Altlastenrecht (Bodenschutzrecht) ergibt sich nicht, wenn man dieses im Falle der Gefahrenabwehr heranzieht. Die Gefahrenabwehr hat Vorrang. /1/

### Kreislaufwirtschaftsgesetz

#### § 40 KrWG

Im § 40 KrWG (Stilllegung) sollte der Deponierückbau verankert werden.

Es wird vorgeschlagen, hinter Abs. 5 z. B. folgenden Text einzufügen:

„Als Abschluss/Stilllegung der Deponie ist auch ein Deponierückbau der gesamten Deponie oder einzelner Deponieabschnitte möglich, der vom Betreiber der Deponie bei der zuständigen Behörde zu beantragen ist. Der Deponierückbau kann während der Stilllegungsphase, Nachsorgephase oder nach Abschluss der Nachsorgephase erfolgen.“ (Letzteres wäre aber noch rechtlich zu regeln.)

#### § 35 Abs. 2 KrWG:

Planfeststellungsverfahren für die Errichtung und den Betrieb einer Deponie sind um eine Regelungen für den Deponierückbau zu ergänzen, z. B.: „Die Errichtung und der Betrieb von Deponien, der Deponierückbau sowie die wesentliche Änderung einer solchen Anlage oder ihres Betriebes bedürfen der Planfeststellung durch die zuständige Behörde.“

#### § 35 Abs. 3 KrWG

##### Plangenehmigungsverfahren

Satz 1, Nr. 3: Ergänzung des Deponierückbaus (Erprobung neuer Verfahren)

Satz 2: ggf. Ergänzung der Ressourcenrückgewinnung bzw. des Ressourcenschutzes als weiterer Zweck zur Durchführung eines Plangenehmigungsverfahrens (neben dem Zweck wesentliche Verbesserung für die Schutzgüter).

## Deponieverordnung

§ 1 Abs. 1 Nr. 1 DepV → Anwendungsbereich erweitern

„Diese Verordnung gilt für

1. die Errichtung, den Betrieb, die Stilllegung, Nachsorge und Rückbau von Deponien,  
...“

§ 2 DepV → Begriffsbestimmungen ergänzen

„Deponierückbau:

Abgrabung der auf einer Deponie abgelagerten Abfälle, entweder der gesamten Deponie oder einzelner Deponieabschnitte“

Nach den §§ 10 und 11 DepV (Stilllegung und Nachsorge) ist ein neuer § 11 a zum Deponierückbau einzufügen:

### Neuer § 11 a DepV „Deponierückbau“

*Zweck des Deponierückbaus ist die Ressourcenrückgewinnung oder die Verbesserung für die Schutzgüter ....*

- Wenn der Rückbau an bestimmte Zwecke (Gewinnung von Sekundärrohstoffen, Vermeidung von akuten oder absehbaren Gefahren, Gewinnung von Nutzungsfläche, Reduzierung der Nachsorgeaufwendungen) gebunden werden soll, dann ist dies vermutlich schwierig zu konkretisieren, ohne Gefahr zu laufen, dass einzelne, sinnvolle Projekte damit verhindert werden. Die Gefahr des Missbrauchs erscheint hier wegen der hohen Kosten sehr gering.

### Inhalte neuer § 11a

*Bei den Anforderungen muss differenziert werden, ob es sich um einen vollständigen Rückbau einer Deponie, eines Deponiekörpers oder um einen Teilrückbau (von Teilbereichen) handelt.*

- „Deponien oder Deponieabschnitte oder Teile von Deponieabschnitten können zurückgebaut werden, wenn eine Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit nicht zu besorgen ist.“
- Hinsichtlich der Antragsunterlagen kann auf § 19 (auf Teile davon) verwiesen werden.
- Es sollte eine Sicherheitsleistung gefordert und daher auch auf § 18 verwiesen werden.
- Das Entwässerungssystem sowie das Gasfassungssystem sind in den noch nicht zurückgebauten Deponiebereichen solange zu erhalten, wie dies für die Fassung von Sickerwasser und Deponiegas erforderlich ist.

- Die Vermeidung oder Verringerung von Geruchsemissionen beim Ausbau des Abfalls soll ggf. durch eine frühzeitige und ausreichende Belüftung des rückzubauenen Deponiekörpers sichergestellt werden.
- Bei der Entnahme von Abfall ist jederzeit sicherzustellen, dass die Standsicherheit des Deponiekörpers nicht beeinträchtigt wird.
- Ggf. Besondere Regelungen zum Rückbau von Bereichen, in denen gezielt asbesthaltige oder ähnliche Abfälle abgelagert wurden.
- Der Wiedereinbau nicht verwerteter Abfallmengen auf der gleichen Deponie richtet sich nach den Anforderungen des § 6. Die Anforderungen an die Annahmekontrolle entfallen, soweit keine Ersatzbaustoffe von außerhalb angenommen werden.
- Für die Kontrollen muss eine Regelung gefunden werden (Verzicht, aber ggf. auch zusätzliche Kontrollmaßnahmen z. B. für Staubemissionen).
- Dito für die Dokumentation
- Ggf. Hinweis zur Notwendigkeit von Vor-Ort-Besichtigungen
- Entlassung aus der Nachsorge, wenn auf Grund der anzusetzenden Kriterien (Grundwassersituation, Standsicherheit des Geländes, Unterhaltung baulicher Einrichtungen) keine Unterhaltung oder Überwachung der Deponie mehr erforderlich erscheint (Anhang 5 Ziffer 10 Nr. 6).

## 7. Literatur / Verfasser

### Literatur

- /1/ Prof. Dr. Dr. Joachim Sanden und Prof. Dr. Dr. h.c.(GTU Tiflis) Thomas Schomerus (2012): Rechtsfragen des Landfill Mining – Weiterentwicklung des Deponierechts zur Rückgewinnung von Ressourcen; Zeitschrift Abfallrecht Nr. 5, 2012
- /2/ DWA / VKU-Themenband (T6/2012): Rückbau von deponierten Abfällen, Oktober 2012
- /3/ Dipl.-Ing. Volmar Wilhelm (2011): Sicherheit und Gesundheitsschutz beim Deponierückbau, BauPortal 2/2011
- /4/ Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG) vom 24.02.2012
- /5/ Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV) vom 27.04.2009, zuletzt geändert durch Verordnung vom 4. März 2016
- /6/ Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundesbodenschutzgesetz – BBodSchG) vom 17.03.1998, *zuletzt geändert 09.12.2004*
- /7/ Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12.07.1999, zuletzt geändert 31.07.2009
- /8/ Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes – Immissionsschutzgesetz – BImSchG) vom 15.03.1974, neugefasst durch Bek. v. 17.05.2013
- /9/ Einkommensteuergesetz (EStG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 8. Oktober 2009 (BGBl. I S. 3366, 3862), das zuletzt durch Artikel 234 des Gesetzes vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist
- /10/ Baumeister Rechtsanwälte: Stellungnahme an die AML vom 17.08.2012

**Verfasser**

- Anita Lerho (Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen – MKULNV)
- Ulrich Sauerland (Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen - MKULNV)
- Gerd Graeber (Bezirksregierung Detmold)
- Dr. Michael Tiedt (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen – LANUV)
- Bernd Becker (Abfallentsorgungsbetrieb des Kreises Minden-Lübbecke – AML)
- Dr. Volker Winter (Ministerium für Arbeit, Integration und Soziales des Landes Nordrhein-Westfalen)



## 11.2. Anhang 2

**Tabelle A 1-1:** Benötigte Maschinen pro Stufe, Anschaffungspreis und Anzahl zur Realisierung der Kapazität der jeweiligen Stufe in Abhängigkeit vom Szenario

	Kapazität je Stufe [t/h]	Listen- preis [EUR/Stk]	Anzahl je Stufe und Szenario [Stk]					
			1a	1b	2a	2b	3a	3b
<b>Stufe 1 (Rückbau)</b>	<b>28</b>							
Kettenbagger		260,000	1	1	1	1	1	1
Radlader		220,000	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Raupe		180,000	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Muldenkipper		175,000	2.5	2.5	2.5	2.5	3.5	3.5
<b>Stufe 2 (Vorkonditionierung)</b>								
<b>Vorkonditionierung mobil</b>	<b>30</b>							
Shredder_mobil		450,000	1	1	1	1	0	0
Trommelsieb 100 mm_mobil_inklFE-Scheidung		200,000	1	1	1	1	0	0
Flächensieb_mobil_inklFE-Scheidung		80,000	1	1	1	1	0	0
Radlader		220,000	2	2	2	2	0	0
Peripherie simpel (Fördertechnik, Stromaggregat)		120,000	1	1	1	1	0	0
Allmetallscheider		250,000	0	0	0	2	0	0
<b>Vorkonditionierung stationär</b>	<b>60</b>							
Shredder_stationär		320,000	0	0	0	0	2	2
Trommelsieb, 100 mm_stationär		60,000	0	0	0	0	2	2
Flächensieb_stationär		70,000	0	0	0	0	2	2
Magnetscheider_stationär		45,000	0	0	0	0	5	5
Paddelsichter		120,000	0	0	0	0	1	1
Windsichter		80,000	0	0	0	0	1	0
Wirbelstromscheider		180,000	0	0	0	0	1	0
Nah-Infrarot-Sortierer		180,000	0	0	0	0	2	0
Peripherie mittel (Bunker, Fördertechnik,...)		677,010	0	0	0	0	0	1
Peripherie aufwändig (Bunker, Fördertechnik, Druckluft,...)		1,221,000	0	0	0	0	1	0
Ballenpresse		150,000	0	0	0	0	1	1
Fuhrpark (Bagger, Radlader, Stapler)		535,000	0	0	0	0	1	1
<b>Stufe 3 (Wiedereinlagerung)</b>	<b>50</b>							
Raupe		180,000	1	1	0	0	0	0
Verdichtungsgerät (Walze)		0	0.1	0.1	0	0	0	0
Muldenkipper		175,000	3.5	3.5	0	0	0	0
<b>Stufe 4 (Biologische Behandlung)</b>	<b>30</b>							
Rotte		8,300,000	0	1	0	0	0	0
<b>Stufe 5 (Feinaufbereitung)</b>	<b>100</b>							
Aufgabebunker		47,000	0	0	1	1	1	1
Trommelsieb		40,000	0	0	1	1	1	1
Nasstrenntisch		421,750	0	0	1	1	1	1
Bandfilterpresse		150,000	0	0	1	1	1	1
Sieb 80 µm		50,000	0	0	1	1	1	1
Setzmaschine		550,000	0	0	1	1	1	1
Prozesswasseraufbereitung		400,000	0	0	1	1	1	1
Peripherie (Pumpen, Förderbänder, ...)		250,000	0	0	1	1	1	1
Überbandmagnet		40,000	0	0	2	2	2	2
optische Sortierung		100,000	0	0	1	1	1	1
Fuhrpark (Bagger, Radlader, Stapler)		200,000	0	0	1	1	1	1

**Tabelle A 1-2: Preise für die verschiedenen Fraktionen**

Fraktion	Einheit	Preis	Quellen
<b>Input:</b>			
Wasser	[€/t]	1.7	Alwast, Riemann (2010)
Polymer	[€/t]	3000	Projektinterne Informationen, ISWW
Strom	[€/kWh]	0.14	Projektinterne Informationen, Tönsmeier
Diesel	[€/l]	1.2	aktueller Marktpreis
<b>Output:</b>			
Energie, elektrisch	[€/MWh]	50	Alwast, Riemann (2010)
Energie, thermisch	[€/MWh]	50	Alwast, Riemann (2010)
<b>Vorkonditionierung Szenarien 1 und 2</b>			
Basispreis Fe-Schrott	[€/t]	170.00	Qualität nach therm. Behandlung, projektinterne Informationen TEER
Basispreis NE-Schrott	[€/t]	1,000.00	Qualität nach therm. Behandlung, projektinterne Informationen TEER
Basispreis Abgabe an EBS-Kraftwerk	[€/t]	-47.50	Mittelwert nach Alwast (2015)
Basispreis Abgabe an MVA	[€/t]	-59.50	Mittelwert nach Alwast (2015)
Basispreis Abgabe an Pyrolyse	[€/t]	-180.00	Projektinterne Informationen, TEER
Input MVA A.1	[€/t]	-59.50	Mittelwert nach Alwast (2015)
Fe-Schrott A.1	[€/t]	5.10	66% Fe-Anteil, projektinterne Informationen, Tönsmeier, TEER
Feingut A.1	[€/t]	-30.00	Annahmepreis „Pohlsche Heide“, feste Massenabfälle
Input MVA D.1	[€/t]	-59.50	Mittelwert nach Alwast (2015)
Fe-Schrott D.1	[€/t]	-67.80	Projektinterne Informationen, TEER
Metallschrott D.1	[€/t]	-12.80	Projektinterne Informationen, TEER
<b>Vorkonditionierung Szenario 3a)</b>			
Input MVA C.1	[€/t]	-59.50	Mittelwert nach Alwast (2015)
Fe-Schrott C.1	[€/t]	-67.80	Projektinterne Informationen, TEER
Mischkunststoffe/Reste C.1	[€/t]	-59.50	Mittelwert nach Alwast (2015)
Kunststoffkörper C.1	[€/t]	88.00	Projektinterne Informationen, IAR
NE-Schrott C.1	[€/t]	290.00	Projektinterne Informationen, TEER
Folienprodukt C.1	[€/t]	80.00	Projektinterne Informationen, IAR
Schwergut aus Paddelsichter C.1	[€/t]	-59.50	Mittelwert nach Alwast (2015)
<b>Vorkonditionierung Szenario 3b)</b>			
Input MVA B.1	[€/t]	-59.50	Mittelwert nach Alwast (2015)
Fe-Schrott B.1	[€/t]	-67.80	Projektinterne Informationen, TEER
Schwergut aus Paddelsichter B.1	[€/t]	-59.50	Mittelwert nach Alwast (2015)
Leichtgut aus Paddelsichter B.1	[€/t]	-50.00	Projektinterne Informationen, Tönsmeier
<b>Feinaufbereitung Szenarien 2 und 3</b>			
Leichtgut_Fein 10-60 mm (Brennstoff)	[€/t]	-71.75	Mittelwert nach Alwast (2015), zzgl. Aufschlag wg. erhöhten Chlor-Werten (TEER)
Leichtgut_Fein < 10 mm (Brennstoff)	[€/t]	-60.50	Mittelwert nach Alwast (2015), zzgl. Aufschlag wg. erhöhten Chlor-Werten (TEER)
Fe-Schrott < 60 mm (Fe-Schrott)	[€/t]	51.00	Projektinterne Informationen, IFAD
Schwergut_Fein 10 - 60 mm (Kies)	[€/t]	3.00	Projektinterne Informationen, LWI
Schwergut_Fein < 10 mm (Kies)	[€/t]	3.00	Projektinterne Informationen, LWI
Glas-Fraktion	[€/t]	5.00	Projektinterne Informationen, LWI
Feinstfraktion < 80 µm (Reststoff)	[€/t]	-30.00	Annahmepreis „Pohlsche Heide“, feste Massenabfälle
Feinstfraktion < 2 mm (Sand)	[€/t]	3.00	Projektinterne Informationen, LWI
Reststoff zur Entsorgung	[€/t]	-30.00	Annahmepreis „Pohlsche Heide“, feste Massenabfälle
Abwasser	[€/t]	-3.00	Projektinterne Informationen, ISWW