

Abschlussbericht

Betrachtung des Ressourcenpotenzials der Kreismülldeponie Hechingen

- Eine ressourcenorientierte, ökonomische, ökologische und technische Abschätzung -

Justus-Liebig-Universität Gießen
Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement
Professur für Abfall- und Ressourcenmanagement

K O N T A K T D A T E N

LEITER DER PROFESSUR

WISSENSCHAFTLICHER MITARBEITER

HERR PROF. DR. STEFAN GÄTH

HERR M. SC. JÖRG NISPEL

HEINRICH-BUFF-RING 26

HEINRICH-BUFF-RING 26

35392 GIEßEN

35392 GIEßEN

0641 – 99 37383

0641 – 99 37377

STEFAN.A.GAETH@UMWELT.UNI-GIESSEN.DE

JOERG.NISPEL@UMWELT.UNI-GIESSEN.DE



W W W . E I N F Ä L L E - F Ü R - A B F Ä L L E . D E

Landratsamt Zollernalbkreis
Abfallwirtschaftsamt

K O N T A K T D A T E N

AMTSLEITER

HERR FRIEDRICH SCHOLTE-REH

HIRSCHBERGSTRASSE 29

72336 BALINGEN

07433 – 92 1320

FRIEDRICH.SCHOLTE-REH@ZOLLERNALBKREIS.DE



W W W . Z O L L E R N A L B K R E I S . D E

INHALTSÜBERSICHT

INHALTSÜBERSICHT	I
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	V
TABELLEN- UND FORMELVERZEICHNIS	XI
ABKÜRZUNGEN.....	XIV
DANKSAGUNG	XVI
1	EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG..... 1
1.1	AUFGABENSTELLUNG UND ZIELSETZUNG4
2	STAND DER FORSCHUNG 5
2.1	DEPONIERÜCKBAU.....5
2.1.1	RECHTLICHE GRUNDLAGEN..... 9
2.1.2	TECHNISCHE MÖGLICHKEITEN DER AUFBEREITUNG..... 12
2.1.2.1	IN-SITU STABILISIERUNG 12
2.1.2.2	ABGRABEVERFAHREN 14
2.1.2.3	TRANSPORT 15
2.1.2.4	DEPONIEGUTBEHANDLUNG 15
2.1.2.4.1	ZERKLEINERUNG 15
2.1.2.4.2	KLASSIERUNG..... 17
2.1.2.4.3	SORTIERUNG..... 21
2.1.2.4.4	AEROBE VERFAHREN DER BIOLOGISCHEN ON-SITE BEHANDLUNG 24
2.2	KOSTEN DES RÜCKBAUS..... 25
2.3	DEMONSTRATIONSPROJEKTE 27
2.3.1	DEPONIE BURGHOF..... 27
2.3.2	ZENTRALDEPONIE DÜSSELDORF HUBBELRATH 30
2.3.3	HESSISCHE DEPONIE ALS ROHSTOFFLAGERSTÄTTEN 33
2.3.4	DEPONIE DEIDERODE 35
2.3.5	VERBUNDVORHABEN DEPONIEKÖRPER..... 36
2.3.6	DEPONIE RENNEROD..... 38
2.3.7	WERTSTOFFPOTENZIAL IN ABFÄLLEN RÜCKGEBAUTER HAUSMÜLLDEPONIE..... 41
2.4	DEPONIEPROZESSE 43

2.4.1	GASHAUSHALT	43
2.4.1.1	AEROBER ABBAU.....	43
2.4.1.2	ANAEROBER ABBAU	44
2.4.1.3	ZEITLICHER VERLAUF DER DEPONIEGASPRODUKTION.....	45
2.4.1.4	GASPROGNOSEMODELLE	49
2.4.2	WASSERHAUSHALT.....	51
2.5	NACHSORGEKONZEPTE FÜR DEPONIEN.....	51
2.5.1	DEPONIESTILLEGUNG UND NACHSORGE.....	52
2.5.1.1	MAßNAHMEN DER STILLEGUNGS- UND NACHSORGEPHASE	52
2.5.1.2	ZEITDAUER DER NACHSORGE.....	54
2.5.1.3	NACHSORGE UND FOLGEKOSTEN.....	55
2.6	ROHSTOFFMÄRKTE UND PREISENTWICKLUNG	59
3	DIE KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN.....	61
3.1	ENTWICKLUNG DER ABFALLWIRTSCHAFT IM ZOLLERNALBKREIS.....	62
4	ANSATZ UND KONZEPTION DER UNTERSUCHUNGEN.....	65
4.1	ERMITTLUNG DER ABLAGERUNGSMENGE.....	65
4.1.1	JAHRESSPEZIFISCHE VARIATION	66
4.1.2	GESAMTABLAGERUNGSMENGE	67
4.1.3	VOLUMENERMITTLUNG.....	68
4.1.4	DIGITALE HÖHENMODELLE.....	69
4.2	RESSOURCENPOTENZIALERMITTLUNG	70
4.2.1	PHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN	71
4.2.1.1	WASSERGEHALT UND TROCKENMASSE.....	71
4.2.1.2	GLÜHVERLUST	72
4.2.1.3	HEIZWERTBERECHNUNG.....	72
4.2.2	THEORETISCHES RESSOURCENPOTENZIAL	74
4.2.2.1	HAUSMÜLLZUSAMMENSETZUNG	74
4.2.2.2	GEWERBEABFALLZUSAMMENSETZUNG.....	74
4.2.2.3	SPERRMÜLL- UND BAUSCHUTTZUSAMMENSETZUNG	75
4.2.3	REALES RESSOURCENPOTENZIAL.....	75
4.2.3.1	LAGE UND TIEFE DER UNTERSUCHUNGEN	75
4.2.3.2	BOHRVERFAHREN	78
4.2.3.3	IN-SITU KLASSIERUNG UND SORTIERUNG	79
4.2.3.4	PROBENAHE UND PROBENUMFANG	80
4.2.3.5	NACHSORTIERUNG DER SORTIERRESTE DER GROBFRAKTION.....	82
4.2.3.6	NACHKLASSIERUNG UND SORTIERUNG DER FEINFRAKTION.....	82
4.2.4	LABORTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN	84

5	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	85
5.1	ABLAGERUNGSMENGE	85
5.1.1	JAHRESSPEZIFISCHE VARIATION.....	85
5.1.2	GESAMTABLAGERUNGSMENGEN.....	91
5.1.3	VOLUMENERMITTLUNG.....	93
5.1.4	DIGITALE HÖHENMODELLE	95
5.2	RESSOURCENPOTENZIALERMITTLUNG	98
5.2.1	PHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN.....	98
5.2.1.1	KORNGRÖßENVERTEILUNG.....	98
5.2.1.2	WASSERGEHALT.....	103
5.2.1.3	GLÜHVERLUST	110
5.2.2	PARAMETERABLEITUNG	115
5.2.2.1	ABBAU DER ORGANISCHEN SUBSTANZ	116
5.2.2.2	WASSERGEHALT.....	118
5.2.3	THEORETISCHES RESSOURCENPOTENZIAL.....	118
5.2.3.1	HAUSMÜLLZUSAMMENSETZUNG	118
5.2.3.2	GEWERBEABFALLZUSAMMENSETZUNG.....	126
5.2.3.3	SPERRMÜLLZUSAMMENSETZUNG	134
5.2.3.4	BAUSCHUTTZUSAMMENSETZUNG	135
5.2.3.5	THEORETISCHE POTENZIALANALYSE	136
5.2.4	REALES RESSOURCENPOTENZIAL	143
5.2.4.1	IN-SITU SORTIERUNG.....	143
5.2.4.2	NACHSORTIERUNG DER FRAKTION < 35 MM.....	151
5.2.4.3	DEPONIEGUTZUSAMMENSETZUNG.....	154
5.2.4.4	REALE POTENZIALANALYSE	159
5.2.5	THEORIE UND REALITÄT	164
5.3	VERWERTUNGSOPTIONEN EINZELNER STOFFFRAKTIONEN	166
5.3.1	STOFFLICHE VERWERTUNG	166
5.3.2	ENERGETISCHE VERWERTUNG	169
5.4	PREISENTWICKLUNG AUSGEWÄHLTER PRIMÄR- UND SEKUNDÄRROHSTOFFE.....	172
5.4.1	EISENERZ UND STAHLSCROTT	172
5.4.2	KUPFER	174
5.4.3	ALUMINIUM	175
5.4.4	PREISPROGNOSEN.....	177
5.5	ÖKOLOGISCHE UND ÖKONOMISCHE BETRACHTUNG.....	181
5.5.1	CO ₂ -EINSPARUNG	181
5.5.2	METALLVERMARKTUNG	182
5.5.3	ENERGIEGEGHALT	183

5.5.4	KOSTEN DES RÜCKBAUS.....	184
5.6	KOSTEN DER NACHSORGE	186
5.7	GANZHEITLICHE BEWERTUNG	187
5.7.1	RÜCKBAU ODER NACHSORGE – AKTUELL.....	188
5.7.2	RÜCKBAU ODER NACHSORGE – ZUKÜNFTIG	189
5.7.3	TECHNISCHER FORTSCHRITT BEI DER DEPONIEGUTAUFBEREITUNG.....	192
5.7.4	ENERGIEPREISENTWICKLUNG	195
5.7.5	ZUSAMMENFASSENDER BETRACHTUNG	197
6	ABSCHLIEßENDE DISKUSSION UND FAZIT	199
6.1	DEPONIEREN ALS RESSOURCENQUELLE	208
6.2	RÜCKBAU ODER NACHSORGE	210
7	ZUSAMMENFASSUNG	213
8	LITERATUR.....	219
9	ANHANG	241

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Teilschritte der Deponieerkundung in Hinblick auf deren Eignung zum Lanfill Mining [EPA - United States Environmental Protection Agency, 1997]	6
Abbildung 2: Entscheidungsmodell über das Zulassungsverfahren beim Deponierückbau [Finck, 1999].....	11
Abbildung 3: Grundlegende Verfahrensschritte der Deponiegutaufbereitung und Techniken der Deponiegutsortierung	12
Abbildung 4: Anteile der auf der Deponie Burghof abgelagerten Abfallarten [Rettenberger, 1996a].....	27
Abbildung 5: Verfahrensschritte der Deponiegutaufbereitung [Rettenberger et al., 1995]	28
Abbildung 6: Zusammensetzung des Deponieguts der Zentraldeponie Hubbelrath.....	31
Abbildung 7: Verfahrensablauf beim Rückbauprojekt auf der Zentraldeponie Hubbelrath [Hütler & Wiskemann, 1995]	32
Abbildung 8: Mittlere Deponiegutzusammensetzung und deren Verwertungs- sowie Entsorgungsoptionen [Hütler & Wiskemann, 1995]... 32	
Abbildung 9: Abgelagerte Stoffströme auf der Deponie Kirschenplantage für den Zeitraum 1973 bis 2005 - Nettomengen nach erfolgtem fünfzigprozentigem Organikabbau	34
Abbildung 10: Kumulierte Fraktionsanteile der 11 hessischen Referenzdeponien für den Zeitraum zwischen 1972 und 2005 - Nettomengen nach erfolgtem fünfzigprozentigem Organikabbau	34
Abbildung 11: Korngrößenverteilung ostdeutscher Deponien in Abhängigkeit des Deponiealters [Ehrig und Brinkmann, 1998].....	37
Abbildung 12: Korngrößenverteilung westdeutscher Deponien in Abhängigkeit des Deponiealters [Ehrig und Brinkmann, 1998].....	38
Abbildung 13: Abschätzung der Zusammensetzung des Deponiekörpers Rennerod Voruntersuchung [Groß, 1998]	39
Abbildung 14: Zusammensetzung des Deponieguts Rennerod Voruntersuchung [Groß, 1998]	39
Abbildung 15: Korngrößenverteilung und Anteil Heizwertreicher Stofffraktionen des Deponieguts Rennerod Voruntersuchung [Groß, 1998]	40
Abbildung 16: Aufbereitungskonzept des ersten Bauabschnitts der Deponie Rennerod auf Basis der Voruntersuchungen [Groß, 1998]	40
Abbildung 17: Zusammensetzung des Rückbaumaterials der Deponie Rennerod nach Stoffgruppen in Gew.- und Vol.-% (Hochrechnung nach [Groß, 1998]) (K P GL T) = Heizwertreiche Fraktion mit $H_u > 11 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	41
Abbildung 18: Schema des mehrstufigen anaeroben Abbaus organischer Substanzen [Bischofsberger et al., 2005]	45
Abbildung 19: Zeitlicher Verlauf der Deponiegaszusammensetzung [Farquhar & Rovers, 1973; Rettenberger & Mezger, 1992], entnommen [Stachowitz, 2004]	47
Abbildung 20: Verlauf der Stilllegung einer Deponie aus abfallrechtlicher Sicht [Burkhardt & Egloffstein, 2005]	56
Abbildung 21: Übersichtsplan der Kreismülldeponie Hechingen und deren Kenndaten	61
Abbildung 22: Luftaufnahme der Kreismülldeponie Hechingen aus dem Jahr 2009.....	61
Abbildung 23: Gemeindeeigener Schuttplatz und Ablagerungspraxis Hechingen [Zollernalbkreis, 2010].....	62
Abbildung 24: Aufnahmen der Kreismülldeponie Hechingen aus dem Jahr 1999 [Zollernalbkreis, 2010].....	62
Abbildung 25: Mittleres Sortierergebnis der Hausmüllsortierungen im Zollernalbkreis aus den Jahren 1987 bis 1989	64
Abbildung 26: Schematische Darstellung der Modellschritte des theoretischen und realen Ressourcenpotenzials	70

Abbildung 27: Übersichtsplan zur Lage der Bohrpunkte der Bohrstaffel I (BI/1 - 6) und der Bohrstaffel II (BII/1 - 3).....	76
Abbildung 28: Bohrlochspezifische Tiefenbereiche der Deponiegutuntersuchungen	77
Abbildung 29: Links: Bohrstaffel I - Kettenbagger mit Bohraufsatz Rechts: Bohrstaffel II – selbstfahrendes Kleinbohrgerät	79
Abbildung 30: Schematische Darstellung des Untersuchungsablaufs je Deponiegutcharge.....	83
Abbildung 31: Jährliche Ablagerung von Hausmüll auf der Kreismülldeponie Hechingen und deren Variation (Standardabweichung der Szenarien)	86
Abbildung 32: Jährliche Ablagerung von Gewerbeabfall auf der Kreismülldeponie Hechingen und deren Variation (Standardabweichung der Szenarien)	86
Abbildung 33: Jährliche Ablagerung von Bauschutt auf der Kreismülldeponie Hechingen und deren Variation (Standardabweichung der Szenarien)	87
Abbildung 34: Jährliche Ablagerung von Schlämmen auf der Kreismülldeponie Hechingen und deren Variation (Standardabweichung der Szenarien)	87
Abbildung 35: Jährliche Ablagerung von Sperrmüll auf der Kreismülldeponie Hechingen und deren Variation (Standardabweichung der Szenarien)	88
Abbildung 36: Jährliche Ablagerung von Sanden auf der Kreismülldeponie Hechingen und deren Variation (Standardabweichung der Szenarien)	88
Abbildung 37: Jährliche Ablagerung von Rekultivierungsmaterial auf der Kreismülldeponie Hechingen und deren Variation (Standardabweichung der Szenarien)	89
Abbildung 38: Jährliche Gesamtablagerungsmenge von Abfällen auf der Kreismülldeponie Hechingen unter Berücksichtigung der Mengenvariation	90
Abbildung 39: Spezifische Anteile der Abfallarten an der jährlichen Gesamtablagerung auf der Kreismülldeponie Hechingen	91
Abbildung 40: Mengenvariation innerhalb der einzelnen Abfallarten und in Bezug auf die mittlere Gesamtablagerungsmenge auf der Kreismülldeponie Hechingen	92
Abbildung 41: Spezifisches Ablagerungsvolumen und Phasen der Abfalldeponierung auf der Kreismülldeponie Hechingen	93
Abbildung 42: Zusammenhang zwischen Ablagerungsvolumen und abgelagerter Abfallmenge auf der Kreismülldeponie Hechingen	94
Abbildung 43: Abgeleitete Dichte der eingelagerten Abfälle auf der Kreismülldeponie Hechingen	94
Abbildung 44: Zusammenhang zwischen Höhe der Untersuchung über NN und dem Alter des Deponieguts der Kreismülldeponie Hechingen	97
Abbildung 45: Mittlere Korngrößenverteilung der Bohrstaffel I und II sowie insgesamt unter Berücksichtigung der FM.....	98
Abbildung 46: Mittlere Korngrößenverteilung der Bohrstaffel I und II sowie insgesamt unter Berücksichtigung der TM.....	99
Abbildung 47: Korngrößenanteile der Fraktionen < 35 mm und > 35 mm in Abhängigkeit des Ablagerungsalters	100
Abbildung 48: Räumliche Verteilung der mittleren Korngrößenanteile der Fraktion < 35 mm unter Berücksichtigung der FM	101
Abbildung 49: Räumliche Verteilung der mittleren Korngrößenanteile der Fraktion > 35 mm unter Berücksichtigung der FM	102
Abbildung 50: Wassergehalte der Fein- und Grobfraktion der Kreismülldeponie Hechingen	103
Abbildung 51: Zusammenhang zwischen Wassergehalt und untersuchter Tiefenregion Feinfraktion der Kreismülldeponie Hechingen....	104
Abbildung 52: Zusammenhang zwischen Wassergehalt und untersuchter Tiefenregion Grobfraktion der Kreismülldeponie Hechingen....	104

Abbildung 53: Zusammenhang des Wassergehalts der Grob- und Feinfraktion der Kreismülldeponie Hechingen 105

Abbildung 54: Mittlerer Wassergehalt der Grobfraktion der Kreismülldeponie Hechingen 107

Abbildung 55: Mittlerer Wassergehalt der Feinfraktion der Kreismülldeponie Hechingen 108

Abbildung 56: Mittlerer stoffspezifischer Wassergehalt des Deponieguts der Kreismülldeponie Hechingen 109

Abbildung 57: Glühverlust der Fein- und Grobfraktion des Deponieguts der Kreismülldeponie Hechingen 110

Abbildung 58: Zusammenhang zwischen Glühverlust und untersuchter Tiefenregion | Feinfraktion der Kreismülldeponie Hechingen 111

Abbildung 59: Zusammenhang zwischen Glühverlust und untersuchter Tiefenregion | Grobfraktion der Kreismülldeponie Hechingen 111

Abbildung 60: Zusammenhang des Glühverlustes der Fraktion < und > 35 mm der Kreismülldeponie Hechingen 112

Abbildung 61: Räumliche Darstellung des mittleren Glühverlustes der Fraktion > 35 mm der Kreismülldeponie Hechingen 113

Abbildung 62: Räumliche Darstellung des mittleren Glühverlustes der Fraktion < 35 mm der Kreismülldeponie Hechingen 114

Abbildung 63: Mittlere stoffspezifische Glühverluste und deren Standardabweichung 115

Abbildung 64: Modellierter jährliche Deponiegasproduktion der Kreismülldeponie Hechingen 117

Abbildung 65: Im Rahmen der Deponiegasproduktion modellierter Abbau der organischen Substanz | Summenkurve 117

Abbildung 66: Zeitspezifische Entwicklung des Metall-Gehalts im Hausmüll | Linearer Trend 120

Abbildung 67: Zeitspezifische Entwicklung des PPK-Gehalts im Hausmüll | Linearer Trend 120

Abbildung 68: Zeitspezifische Entwicklung des Glas-Gehalts im Hausmüll | Linearer Trend 121

Abbildung 69: Zeitspezifische Entwicklung des Kunststoff-Gehalts im Hausmüll | Linearer Trend 121

Abbildung 70: Zeitspezifische Entwicklung des Organik-Gehalts im Hausmüll | Linearer Trend 121

Abbildung 71: Zeitspezifische Entwicklung des Textilien-Gehalts im Hausmüll | Linearer Trend 122

Abbildung 72: Zeitspezifische Entwicklung des Mineralstoff-Gehalts im Hausmüll | Linearer Trend 122

Abbildung 73: Zeitspezifische Entwicklung des Gehalts an komplexen Produkten im Hausmüll | Linearer Trend 122

Abbildung 74: Zeitspezifische Entwicklung des Gehalts an Verbundverpackungen im Hausmüll | Linearer Trend 123

Abbildung 75: Zeitspezifische Entwicklung des Schadstoff-Gehalts im Hausmüll | Linearer Trend 123

Abbildung 76: Zeitspezifische Entwicklung des Gehalts an Stoffen ang. im Hausmüll | Linearer Trend 123

Abbildung 77: Zeitspezifische Entwicklung des Gehalts an Rest- und Feinmaterialien im Hausmüll | Linearer Trend 124

Abbildung 78: Zeitspezifische Entwicklung des spezifischen Hausmüllaufkommens | Linearer Trend 124

Abbildung 79: Veränderung des Anteils der NE-Metalle gemessen am jahresspezifischen Gesamtmetallgehalt 125

Abbildung 80: Metall-Gehalt im Gewerbeabfall nach Branchen 128

Abbildung 81: PPK-Gehalt im Gewerbeabfall nach Branchen 128

Abbildung 82: Glas-Gehalt im Gewerbeabfall nach Branchen 129

Abbildung 83: Kunststoff-Gehalt im Gewerbeabfall nach Branchen 129

Abbildung 84: Organik-Gehalt im Gewerbeabfall nach Branchen.....	129
Abbildung 85: Holz-Gehalt im Gewerbeabfall nach Branchen	130
Abbildung 86: Textilien-Gehalt im Gewerbeabfall nach Branchen	130
Abbildung 87: Mineralstoff-Gehalt im Gewerbeabfall nach Branchen	130
Abbildung 88: Schadstoff-Gehalt im Gewerbeabfall nach Branchen	131
Abbildung 89: Gehalt an Sortierresten im Gewerbeabfall nach Branchen.....	131
Abbildung 90: Gehalt an Feinmaterial im Gewerbeabfall nach Branchen	131
Abbildung 91: Gehalt an hausmüllartigen Materialien im Gewerbeabfall nach Branchen	132
Abbildung 92: Gehalt an sperrmüllartigen Materialien im Gewerbeabfall nach Branchen.....	132
Abbildung 93: Gehalt an Boden und Erde im Gewerbeabfall nach Branchen	132
Abbildung 94: Gehalt an Schlämmen im Gewerbeabfall nach Branchen.....	133
Abbildung 95: Zusammensetzung von Gewerbeabfällen des Textil- und Bekleidungsgebietes [Müller et al., 1994]	133
Abbildung 96: Zusammenfassender Überblick zur Zusammensetzung von Sperrmüll	134
Abbildung 97: Gesamtbetrachtung zur stofflichen Zusammensetzung von Bauschutt.....	135
Abbildung 98: Auswirkung der Variation der Ablagerungsmenge (MIN, MW, MAX) auf die Rohstoffpotenzialermittlung Gesamtbetrachtung Theorie (vergl. Anhang 61).....	137
Abbildung 99: Variationskoeffizient der abgelagerten Stofffraktionen unter Betrachtung der mittleren stoffspezifischen Gesamtablagerungsmenge Variation Ablagerungsmenge Theorie	138
Abbildung 100: Auswirkung der Variation der Abfallzusammensetzung unter Berücksichtigung der mittleren Gesamtablagerungsmenge Gesamtbetrachtung Theorie (vergl. Anhang 63).....	139
Abbildung 101: Variationskoeffizient der abgelagerten Stofffraktionen unter Betrachtung der mittleren stoffspezifischen Gesamtablagerungsmenge Variation Abfallzusammensetzung Theorie	140
Abbildung 102: Theoretisches Rohstoffpotenzial der Kreismülldeponie Hechingen unter Berücksichtigung des Abbaus der organischen Substanz (Ausgangsmasse: 2.133.638 Mg wovon 243.293 Mg organische Substanz abgebaut wurden – vergl. Anhang 65)..	141
Abbildung 103: Theoretisches Rohstoffpotenzial der Kreismülldeponie Hechingen unter Berücksichtigung des Abbaus der organischen Substanz und stoffspezifischer Wassergehalte (Ausgangsmasse: 2.133.638 Mg wovon 243.293 Mg organische Substanz abgebaut wurden und 677.244 Mg Wasser abzuziehen sind– vergl. Anhang 66).....	141
Abbildung 104: Theoretische Zusammensetzung des Deponieguts unter Berücksichtigung des Abbaus der organischen Substanz und stoffspezifischer Wassergehalte	142
Abbildung 105: Durchschnittliche Zusammensetzung des untersuchten Deponieguts in Bezug zur gesamten Untersuchungsmasse unter Berücksichtigung der Bohrstaffeln I und II (BI und BII) sowie deren Mittelwert (Gesamt) – vergl. Anhang 68	143
Abbildung 106: Durchschnittliche Zusammensetzung des untersuchten Deponieguts in Bezug zur Untersuchungsmasse > 35 mm unter Berücksichtigung der Bohrstaffeln I und II (BI und BII) sowie deren Mittelwert (Gesamt)	144
Abbildung 107: Schwankungsbreite der Stofffraktionsanteile an der Gesamtuntersuchungsmasse Alle Deponiegutchargen berücksichtigt (Anhang 68)	145
Abbildung 108: Schwankungsbreite der Stofffraktionsanteile an der Fraktion > 35 mm Alle Deponiegutchargen berücksichtigt	145
Abbildung 109: Räumliche Verteilung des Metallgehalts der Fraktion > 35 mm über den Deponiekörper der Kreismülldeponie Hechingen	148

Abbildung 110: Räumliche Verteilung des Gehalts an heizwertreichen Fraktionen in Bezug zur Fraktion > 35 mm über den Deponiekörper der Kreismülldeponie Hechingen.....	149
Abbildung 111: Räumliche Verteilung des Gehalts an inerten Materialien in Bezug zur Fraktion > 35 mm über den Deponiekörper der Kreismülldeponie Hechingen.....	150
Abbildung 112: Durchschnittliche Zusammensetzung des untersuchten Deponieguts in Bezug zur gesamten Untersuchungsmasse < 35 mm unter Berücksichtigung der Bohrstaffeln I und II (BI und BII) sowie deren Mittelwert (Gesamt) – vergl. Anhang 97	151
Abbildung 113: Durchschnittliche Zusammensetzung des untersuchten Deponieguts in Bezug zur gesamten Untersuchungsmasse 5 - 35 mm unter Berücksichtigung der Bohrstaffeln I und II (BI und BII) sowie deren Mittelwert (Gesamt) – vergl. Anhang 99	152
Abbildung 114: Variationsbreite der Zusammensetzung der untersuchten Deponiegutchargen unter Berücksichtigung der Fraktionsmenge < 35 mm (vergl. Anhang 97).....	153
Abbildung 115: Variationsbreite der Zusammensetzung der untersuchten Deponiegutchargen unter Berücksichtigung der Fraktionsmenge 5 - 35 mm (vergl. Anhang 99)	154
Abbildung 116: Mittlere Deponiegutzusammensetzung unter Berücksichtigung der Gesamtuntersuchungsmasse unter Berücksichtigung der Bohrstaffeln I und II (BI und BII) sowie deren Mittelwert (Gesamt).....	155
Abbildung 117: Mittlere Deponiegutzusammensetzung in Bezug auf die Untersuchungsmasse > 5 mm unter Berücksichtigung der Bohrstaffeln I und II (BI und BII) sowie deren Mittelwert (Gesamt).....	155
Abbildung 118: Variationsbreite der Deponiegutzusammensetzung > 5 mm unter Berücksichtigung der Gesamtuntersuchungsmasse.....	156
Abbildung 119: Variationsbreite der Deponiegutzusammensetzung > 5 mm unter Berücksichtigung der Untersuchungsmasse > 5 mm.....	157
Abbildung 120: Mittlere Stoffgehalte unter Berücksichtigung des spezifischen Wassergehalts der Kreismülldeponie Hechingen.....	158
Abbildung 121: Variationsbreite der Anteile der Stofffraktionen unter Berücksichtigung der Gesamtuntersuchungsmasse	158
Abbildung 122: Variationsbreite der Anteile der Stofffraktionen unter Berücksichtigung der Masse der Fraktion > 5 mm.....	159
Abbildung 123: Auswirkung der Variation der Ablagerungsmenge auf das Stoffpotenzial der Kreismülldeponie Hechingen bei gleichbleibender Deponiegutzusammensetzung Gesamtbetrachtung Real (vergl. Anhang 100 – 102).....	160
Abbildung 124: Auswirkung der Variation der Deponiegutzusammensetzung unter Berücksichtigung der mittleren Gesamtablagerungsmenge Gesamtbetrachtung Real (vergl. Anhang 103 und 104).....	161
Abbildung 125: Variationskoeffizient der abgelagerten Stofffraktionen unter Betrachtung der mittleren stoffspezifischen Gesamtablagerungsmenge Variation Deponiegutzusammensetzung Real	162
Abbildung 126: Reales Rohstoffpotenzial unter Berücksichtigung des Abbaus der organischen Substanz (Ausgangsmasse: 2.133.638 Mg wovon 243.293 Mg organische Substanz abgebaut wurden)	163
Abbildung 127: Reale Zusammensetzung des Deponieguts unter Berücksichtigung des Abbaus der organischen Substanz und stoffspezifischer Wassergehalte (Ausgangsmasse: 2.133.638 Mg wovon 243.293 Mg organische Substanz abgebaut wurden und 686.015 Mg Wasser abzuziehen sind)	164
Abbildung 128: Gegenüberstellung des mittleren realen und theoretischen Ressourcenpotenzials der Kreismülldeponie Hechingen * incl. Rekultivierung/ Erdaushub	165
Abbildung 129: Anteil einzelner Stofffraktionen an der heizwertreichen Fraktion [Gew.-% TM].....	169
Abbildung 130: Errechnete mittlere Heizwerte der Stofffraktionen.....	170
Abbildung 131: Preisentwicklung für Stahlschrott und Eisenerz im Verlauf des Zeitraums Januar 2001 bis Januar 2011	173
Abbildung 132: Zusammenhang des Stahlschrott- und Eisenerzpreises.....	173
Abbildung 133: Preisentwicklung für Kupferschrott und Primärkupfer im Verlauf des Zeitraums Januar 2001 bis Januar 2011	174

Abbildung 134: Zusammenhang des Kupferschrott- und Primärkupferpreises	175
Abbildung 135: Preisentwicklung für Aluminiumschrott und Aluminium im Verlauf des Zeitraums Januar 2001 bis Januar 2011	176
Abbildung 136: Zusammenhang des Aluminiumschrott- und Aluminiumpreises	176
Abbildung 137: Prognostizierte Stahlschrottpreisentwicklung bis zum Jahr 2062.....	177
Abbildung 138: Prognostizierte Aluminiumschrottpreisentwicklung bis zum Jahr 2062	178
Abbildung 139: Prognostizierte Kupferschrottpreisentwicklung bis zum Jahr 2062	178
Abbildung 140: Entwicklung des Primärkupferpreises in Abhängigkeit des Bruttoinlandsproduktes weltweit von 1970 – 2002 (dunkelgrau) und 2003 – 2009 (rot).....	179
Abbildung 141: Entwicklung des Primärkupferpreises in Abhängigkeit der Weltbevölkerung von 1970 – 2002 (dunkelgrau) und 2003 – 2009 (rot)	179
Abbildung 142: Entwicklung des Primärkupferpreises in Abhängigkeit des Erdölpreises von 1970 – 2002 (dunkelgrau) und 2003 - 2009 (rot)	180
Abbildung 143: CO ₂ -Einsparpotenziale der Kreismülldeponie Hechingen (vergl. Anhang 105)	181
Abbildung 144: Potenzielle Wertschöpfung der Metallvermarktung	183
Abbildung 145: Energetische Betrachtung der heizwertreichen Fraktion unter Beachtung unterschiedlicher Wirkungsgrade bei der Energieerzeugung.....	184
Abbildung 146: Minimale, mittlere und maximale Rückbaukosten unter Berücksichtigung spezifischer Kenngrößen (vergl. Tabelle 37)	186
Abbildung 147: Modellierte Nachsorgekosten der Kreismülldeponie Hechingen.....	186
Abbildung 149: Nachsorgekosten der Kreismülldeponie Hechingen unter Berücksichtigung einer 50 Jahre andauernden Nachsorgephase	187
Abbildung 150: Kosten und Erlöse des Rückbaus der Kreismülldeponie Hechingen in Abhängigkeit des Rückbauzeitpunkts	191
Abbildung 151: Kostenreduktion der Aufbereitung von Deponiegut durch Steigerung der Aufbereitungseffizienz und des technischen Fortschritts (Bezugsbasis: modellierten Aufbereitungskosten des Jahres 2011)	192
Abbildung 152: Kosten und Erlöse des Rückbaus der Kreismülldeponie Hechingen in Abhängigkeit des Rückbauzeitpunkts bei einer 10-prozentigen Kosteneinsparung der Deponiegutaufbereitung durch Effizienzsteigerung und technischen Fortschritt.....	194
Abbildung 153: Kosten und Erlöse des Rückbaus der Kreismülldeponie Hechingen in Abhängigkeit des Rückbauzeitpunkts bei einer 30-prozentigen Kosteneinsparung der Deponiegutaufbereitung durch Effizienzsteigerung und technischen Fortschritt.....	194
Abbildung 154: Im Rahmen der Folgemodellierung angenommene Preisentwicklungen auf dem EBS-Rohstoffmarkt von 2011 bis 2060....	196
Abbildung 155: Kosten und Erlöse des Rückbaus der Kreismülldeponie Hechingen in Abhängigkeit des Rückbauzeitpunkts bei einer 30-prozentigen Kosteneinsparung der Deponiegutaufbereitung durch Effizienzsteigerung und technischen Fortschritt sowie den in Abbildung 153 aufgezeigten Preisentwicklungen auf dem EBS-Rohstoffmarkt (Modell I)	196
Abbildung 156: Kosten und Erlöse des Rückbaus der Kreismülldeponie Hechingen in Abhängigkeit des Rückbauzeitpunkts bei einer 30-prozentigen Kosteneinsparung der Deponiegutaufbereitung durch Effizienzsteigerung und technischen Fortschritt sowie den in Abbildung 153 aufgezeigten Preisentwicklungen auf dem EBS-Rohstoffmarkt (Modell II)	197
Abbildung 157: Auswirkungen veränderter Rahmenbedingungen (technische Weiterentwicklung und Energiepreisentwicklung) auf die Kosten und Erlöse des Rückbaus der Kreismülldeponie Hechingen (Ausgangsszenario aller Betrachtungen ist jeweils Szenario MW).....	198
Abbildung 158: Gegenüberstellung des theoretischen Ressourcenpotenzials der Kreismülldeponie Hechingen zu Werten der Literatur Bezug zur FM	200

Abbildung 159: Gegenüberstellung des theoretischen Ressourcenpotenzials der Kreismülldeponie Hechingen zu Werten der Literatur Bezug zur TM	201
Abbildung 160: Über- und Unterschätzung des realen Ressourcenpotenzials durch das theoretische Ressourcenpotenzial der Kreismülldeponie Hechingen (Mittelwerte)	203
Abbildung 161: Über- und Unterschätzung des realen Ressourcenpotenzials durch das theoretische Ressourcenpotenzial der Kreismülldeponie Hechingen in Hinblick auf die Verwertung von Metallen und einer heizwertreichen Fraktion (Mittelwerte)	204
Abbildung 162: Vergleichende Darstellung des realen Ressourcenpotenzials der Kreismülldeponie Hechingen mit Ergebnissen ähnlicher Vorhaben bzw. stattgefundener Rückbauprojekte	205

TABELLEN- UND FORMELVERZEICHNIS

Tabelle 1: Gegenüberstellung der wesentlichen Merkmale bzw. Unterschiede der betrachteten Stabilisierungsverfahren	14
Tabelle 2: Einsatzgebiete von Zerkleinerern in der Abfallaufbereitung [Kranert & Cord-Landwehr, 2010]	17
Tabelle 3: Siebdurchgänge ausgewählter Deponierückbauprojekte	20
Tabelle 4: Eignung von Altabfällen/ Deponiegut zur aeroben Nachbehandlung [Wengenroth, 1995]	25
Tabelle 5: Spezifische Kosten des Deponierückbaus – Angaben beziehen sich auf die Masse des rückgebauten Deponieguts abgeändert nach Bölte & Geiping [2011]	26
Tabelle 6: Deponiecharakteristika des Verbundvorhabens Deponiekörper [Dohmann, 1997]	36
Tabelle 7: Sortieranalyseergebnisse der Grob- und Mittelfraktion [Christ et al., 2011]	42
Tabelle 8: Konzentrationen seltener Erden in Grob-, Mittel- und Feinfraktionen aus dem Deponierückbau [Christ et al., 2011]	42
Tabelle 9: Gasproduktionspotenzial von Hausmüll - Zusammenstellung von Ergebnissen aus Laborversuchen [Rettenberger & Mezger, 1992]	49
Tabelle 10: C _{org} -Gehalt unterschiedlicher Abfallarten	50
Tabelle 11: Abschätzung des Zeitraums bis zum Erreichen der jeweiligen Grenzkonzentration gemäß Anforderungswerten Anhang 51 AbwV [Eitner, 2010c]	54
Tabelle 12: Spezifische Folgekosten für Hausmülldeponien in Abhängigkeit des Ablagerungsvolumens und der Ablagerungsfläche [Burkhardt & Egloffstein, 2005]	57
Tabelle 13: Rückstellungskosten für unterschiedliche Siedlungsabfalldeponien	57
Tabelle 14: Praxisnahe Folgekostenkalkulation [Stegmann et al., 2006]	58
Tabelle 15: Mittlere Verteilung des Kostenaufwands für Stilllegung und Nachsorge [Bartl, 2005]	59
Tabelle 16: Durchschnittlicher Rohstoffverbrauch pro Einwohner und Jahr [Allianz Global Investors, 2011]	59
Tabelle 17: Kenndaten der abfallwirtschaftlichen Entwicklung im Zollernalbkreis [Zollernalbkreis, 2010]	63
Tabelle 18: Dichte von Abfällen in Abhängigkeit der Abfallart	66

Tabelle 19: Szenariobetrachtung zur Bestimmung der Ablagerungsmenge auf der Kreismülldeponie Hechingen.....	66
Tabelle 20: Spezifische Ablagerungsmächtigkeiten der Kreismülldeponie Hechingen	69
Tabelle 21: Prozentuale Branchenzusammensetzung des Zollernalbkreises	74
Tabelle 22: Bohrlochspezifische Tiefenbereiche der Deponiegutuntersuchungen	78
Tabelle 23: Stoffgruppenkatalog der Sortieruntersuchungen nach Angaben des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie [1998]	80
Tabelle 24: Untersuchte Mengen der einzelnen Deponiegutchargen	81
Tabelle 25: Vergleichende Zusammenstellung der eingesetzten Laboruntersuchungen zur stofflichen Charakterisierung der Feinfraktion und ausgewählter Stofffraktionen	84
Tabelle 26: Gesamtablagerungsmenge auf der Kreismülldeponie Hechingen nach Abfallarten unter Berücksichtigung abgeleiteter minimaler, mittlerer und maximaler Ablagerungsmengen.....	91
Tabelle 27: Zusammenfassende Darstellung zur Zuordnung der Deponiegutchargen zum Ablagerungsjahr	96
Tabelle 28: Kennwerte der Wassergehalte der Stofffraktionen in Gew.-% der FM	118
Tabelle 29: Abfallzusammensetzung von Gewerbeabfällen abgeändert nach Bidlingmaier & Kranert [2004]	127
Tabelle 30: Zusammenfassung der Stofffraktionen zu Stoffgruppen	147
Tabelle 31: Ergebnisse der Eluatuntersuchungen der Feinfraktion der Kreismülldeponie Hechingen.....	166
Tabelle 32: Ergebnisse der Eluatuntersuchungen der mineralischen Fraktion > 35 mm der Kreismülldeponie Hechingen.....	168
Tabelle 33: Ergebnisse der Schwermetallanalytik sowie die berechneten Chlorgehalte der heizwertreichen Fraktion im Vergleich zu den Anforderungen der EBS-Abnehmer	171
Tabelle 34: Spezifische CO ₂ -Einsparung durch das Recycling einzelner Stofffraktionen	181
Tabelle 35: Fe-Metallgehalte der Kreismülldeponie Hechingen und Charakterisierung der NE-Metalle	182
Tabelle 36: Wirkungsgrade unterschiedlicher Kraftwerke [Hölzle, 2011]	183
Tabelle 37: Kosten des Rückbaus der Kreismülldeponie Hechingen	185
Tabelle 38: Bilanzierung der aufgestellten Kosten und Erlöse des Rückbaus der Kreismülldeponie Hechingen für das Jahr 2011.....	188
Tabelle 39: Bilanzierung der aufgestellten Kosten und Erlöse des Rückbaus der Kreismülldeponie Hechingen für das Jahr 2020.....	189
Tabelle 40: Bilanzierung der aufgestellten Kosten und Erlöse des Rückbaus der Kreismülldeponie Hechingen für das Jahr 2030.....	189
Tabelle 41: Bilanzierung der aufgestellten Kosten und Erlöse des Rückbaus der Kreismülldeponie Hechingen für das Jahr 2040.....	189
Tabelle 42: Bilanzierung der aufgestellten Kosten und Erlöse des Rückbaus der Kreismülldeponie Hechingen für das Jahr 2050.....	189
Tabelle 43: Bilanzierung der aufgestellten Kosten und Erlöse des Rückbaus der Kreismülldeponie Hechingen für das Jahr 2060.....	190
Formel 1: Prognosemodell zur Abschätzung der potenziellen Deponiegasproduktion	49
Formel 2: Berechnungsgrundlage des Abbaus der organischen Substanz	50
Formel 3: Einflussgrößen auf den Wasserhaushalt einer Deponie	51

Formel 4: Berechnung des jahresspezifischen Mittelwerts der Abfallablagerung nach Abfallarten	67
Formel 5: Berechnung der jahresspezifischen Standardabweichung nach Abfallarten	67
Formel 6: Berechnung des jahresspezifischen Variationskoeffizienten nach Abfallarten	67
Formel 7: Berechnung der mittleren Gesamtablagerungsmenge nach Abfallarten.....	67
Formel 8: Berechnung der Standardabweichung der Gesamtablagerungsmenge nach Abfallarten	68
Formel 9: Berechnung des Variationskoeffizienten nach Abfallarten.....	68
Formel 10: Berechnung des Variationskoeffizienten der Abfallarten in Bezug zur Gesamtablagerungsmenge	68
Formel 11: Berechnung des tagesspezifischen Ablagerungsvolumens	69
Formel 12: Bestimmung des Wassergehaltes	71
Formel 13: Bestimmung der Trockenmasse	72
Formel 14: Bestimmung des Glühverlustes	72
Formel 15: Berechnung des Heizwerts der wasserfreien Substanz [Kost, 2001]	73
Formel 16: Berechnung des Heizwerts der ungetrockneten Deponiegutprobe [Kost, 2001].....	73
Formel 17: Ableitung des Ablagerungsjahres unter Berücksichtigung der Ablagerungshöhe über NN	96
Formel 18: Funktionaler Zusammenhang des Wassergehalts der Fraktionen < und > 35 mm der Kreismülldeponie Hechingen	105
Formel 19: Funktionaler Zusammenhang des Glühverlustes der Fraktionen < und > 35 mm der Kreismülldeponie Hechingen	111
Formel 20: Trendfunktion der Preisentwicklung von Stahlschrott	172
Formel 21: Trendfunktion der Preisentwicklung von Kupferschrott.....	174
Formel 22: Trendfunktion der Preisentwicklung von Aluminiumschrott	175
Formel 23: Kostenentwicklung der Nachsorgephase.....	187

ABKÜRZUNGEN

Abkürzung	Bedeutung
µg	MIKROGRAMM
µS	MIKROSIEMENS
a	JAHRE
Al	ALUMINIUM
ang.	ANDERWEITIG NICHT AUFGEFÜHRT
AOX	ADSORBIERBARE ORGANISCH GEBUNDENE HALOGENE
bbf	BLUE BARREL (159 LITER)
BIP	BRUTTOINLANDSPRODUKT
BMK	BIOMASSEKRAFTWERK
BRIC	BRASILIE, RUSSLAND, INDIEN UND CHINA
BSB ₅	BIOCHEMISCHE SAUERSTOFFBEDARF UNTER STANDARDBEDINGUNGEN UND EINER VERSUCHSDAUER VON 5 TAGEN
CaCO ₃	CALCIUMCARBONAT
CH ₄	METHAN
cm	ZENTIMETER
CO ₂	KOHLENDIOXID
CSB	CHEMISCHER SAUERSTOFFBEDARF
Cu	KUPFER
DK	DEPONIEKLASSE
DOC	DISSOLVED ORGANIC CARBON
DSR	DEPONIESIMULATIONSREAKTOREN
E	EINWOHNER
EBS	ERSATZBRENNSTOFFE
EOX	EXTRAHIERBARE ORGANISCHE HALOGENVERBINDUNGEN
EU	EUROPÄISCHE UNION
Feinfraktion	FRAKTION < 35 MM
Fe-Metalle	EISENMETALLE
FM	FRISCHMASSE
GB ₂₁	GASBILDUNGSPOTENZIAL ÜBER 21 TAGE
GDP	GROSS DOMESTIC PRODUCT BZW. BRUTTOINLANDSPRODUKT
Gew.-%	GEWICHTSPROZENT
GOK	GELÄNDEOBERKANTE
Grobfraktion	FRAKTION > 35 MM
H ₂	WASSERSTOFF
H ₂ O	WASSER
ha	HEKTAR
Heizwertreiche Fraktion	UMFASST DIE FRAKTIONEN: PPK, KUNSTSTOFFE, HOLZ, TEXTILIEN, VERPACKUNGEN, KOML. PRODUKTE, STOFFE ANG. UND SORTIERRESTE
K P GL T	HEIZWERTREICHE FRAKTION MIT H _u > 11 MJ*KG ⁻¹
KEA	KUMULIERTER ENERGIEAUFWAND
kg	KILOGRAMM
KI	KONFIDENZINTERVALL
kJ	KILOJOULE
l	LITER
m	METER
m ³	KUBIKMETER
MAK	MAXIMALE ARBEITSPLATZ-KONZENTRATION
MAX	MAXIMUM

MBA	MECHANISCH-BIOLOGISCHE ABFALLBEHANDLUNGSANLAGE
Mg	MEGAGRAMM TONNEN
mg	MILLIGRAMM
MIN	MINIMUM
Mio.	MILLIONEN
ml	MILLILITER
MVA	MÜLLVERBRENNUNGSANLAGE
MW	MITTELWERT
NE-Metalle	NICHTEISENMETALLE
NIR	NAHINFRAROT
NN	NORMALNULL
OECD	ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES INTERNATIONALE ORGANISATION MIT 34 MITGLIEDSTAATEN
oTS _{bio}	ORGANISCHE TROCKENSUBSTANZ
PAK	POLYCYCLISCHE AROMATISCHE KOHLENWASSERSTOFFE
PPK	PAPIER, PAPPE UND KARTONAGEN
S.n.m.	SORTIERUNG NICHT MÖGLICH
SBS	SEKUNDÄRBRENNSTOFF
SD	STANDARDABWEICHUNG
TIN	TRIANGULATED IRREGULAR NETWORK
TKN	TOTAL KJELDAHL NITROGEN
TM	TROCKENMASSE
UN	UNITED NATIONS
US-\$/ USD	US-DOLLAR
USA	UNITED STATES OF AMERICA
Vol.-%	VOLUMENPROZENT
w	WOCHEN

DANKSAGUNG

Der vorliegende Abschlussbericht führt die Ergebnisse des seit dem Jahr 2008 laufenden Forschungs- und Entwicklungsvorhabens zur Erkundung des Ressourcenpotenzials der Kreismülldeponie Hechingen zusammen.

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

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

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

Für die gute Zusammenarbeit, Unterstützung und Projektbegleitung möchten wir dem Abfallwirtschaftsamt des Landratsamtes Zollernalbkreis, den Mitarbeitern der Kreismülldeponie Hechingen sowie allen weiteren beteiligten Personen recht herzlich danken. Ein besonderer Dank gilt an dieser Stelle Herrn Friedrich Scholte-Reh und Herrn Matthias Frankenberg.

Ohne die finanzielle und fachliche Unterstützung des Vorhabens durch das Umweltministerium Baden-Württemberg wäre das vorliegende Vorhaben nicht möglich gewesen. Dafür gilt unser außerordentlicher Dank.

1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Primäre Ressourcen wie Stahl und Energie werden in zunehmendem Maße knapper. Dazu trägt in erster Linie die steigende Nachfrage nach Rohstoffen bei. Dies führte bzw. führt letztlich dazu, dass auf den nationalen und internationalen Primär- sowie Sekundärrohstoffmärkten die Preise stark gestiegen sind und auch weiterhin steigen werden.

An dieser aktuellen Situation wird sich prinzipiell nichts ändern. Es ist eher zu erwarten, dass sich die Marktlage mit steigender Weltbevölkerung und entsprechendem Konsumwandel noch drastischer entwickelt [RWI ESSEN ET AL., 2006].

In diesem Zusammenhang zeigen Prognosen, dass im Jahr 2050 ca. 9,3 Milliarden Menschen auf der Erde leben und Produkte konsumieren werden [DSW, 2011]. Neben Grundnahrungsmitteln wird demnach, durch sich ändernde Konsummuster, auch der Verbrauch an industriellen Rohstoffen stark ansteigen.

Untersuchungen der Firma SHELL [2009] erwarten in diesem Kontext, dass die weltweite Automobilflotte um den Faktor zwei bis drei steigen wird. Im Bereich der Hightech-Technologien wie bspw. der Mobilfunkbranche und Techniken der erneuerbaren Energien sind noch drastischere Wachstumsraten zu erwarten [WIRTSCHAFTS WOCHE, 2010].

Gleiches gilt für den globalen Energiehunger, der bis zum Jahr 2050 um 70 bis 100 % steigen soll [SPIEGEL ONLINE, 2007].

Die Folgen dieser Entwicklungen sind klar: Preise für mineralische und energetische Rohstoffe werden weiter steigen - ebenso der damit verbundene CO₂-Ausstoß.

In den nächsten Jahren bis Jahrzehnten kommt demnach auf die Weltbevölkerung eine große Aufgabe zu, die es zu lösen gilt. Alternative und nachhaltige Lösungen zu finden, wird damit immer dringender [SCHNEIDER, 2011].

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

Neben primären anthropogenen Rohstofflagern, die sich in den meisten Fällen in einer aktiven Nutzung befinden, sind Hausmülldeponien ungenutzte Rohstoffdepots, die über Jahrzehnte befüllt wurden. Ein entsprechend hohes Rohstoffpotenzial dieser Lagerstätten ist aufgrund damals nicht vorhandener Getrennsammelsysteme zu vermuten.

Auf Hausmülldeponien wie der Kreismülldeponie Hechingen wurden bis zum 01.06.2005 bzw. ihrer Stilllegung Abfälle zur Beseitigung unvorbehandelt abgelagert, wie es Praxis seit mehreren Jahrzehnten war. Erst die Einführung der Getrennsammlung und die Forderung nach der Verwertung von Abfällen im Zuge des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes hat ab Anfang der 90er Jahre zu einer Veränderung der Ablagerungspraxis geführt.

Eine Vorbehandlung mit dem Ziel, die Rohstoffe von den ablagerungsfähigen Schadstofffraktionen zu trennen, fand aufgrund geringer Beseitigungskosten und geringer Rohstoffkosten nicht statt. Vergleichbares gilt für Gewerbeabfälle, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle sowie Sperrmüll und Bauschutt.

Zu den auf der Kreismülldeponie Hechingen abgelagerten Abfällen gehören alle Stofffraktionen, wie sie auch heute in unseren Getrenntsammlensystemen anfallen, wobei sich die Zusammensetzung der unterschiedlichen Fraktionen wie PPK, Kunststoffe, Organik, Mineralstoffe, Elektronikschrott etc. im Laufe der Nutzung entsprechend dem gesellschaftlichen Konsum- und Produktionsverhalten geändert hat.

Dies bedeutet, dass Hausmülldeponien wie die Kreismülldeponie Hechingen anthropogene Rohstofflager darstellen, deren Inhalt und Werthhaftigkeit von der Nutzung und der Nutzungsdauer abhängig ist. Es wird erwartet, dass die Nutzung der in den Deponien enthaltenen Rohstoffe durch Rückbau mit steigender Rohstoffknappheit wirtschaftlich erforderlich wird. Der Rohstoffgehalt und damit der Rohstoffwert einer Deponie ist jedoch bislang unbekannt [GÄTH & NISPEL, 2011].

In diesem Zusammenhang ist allerdings zu bedenken, dass auch schadstoffhaltige Abfälle (z.B. Asbest, Batterien, Farben) während der Betriebsphase auf der Kreismülldeponie eingelagert wurden, deren Verwertung oder Beseitigung bei der Nutzbarmachung der deponierten Rohstoffe umweltgerecht zu erfolgen hat. Hierbei zeigt sich, dass damalige Schadstoffe wie bspw. Batterien heute im besten Fall wirtschaftliche Erlöse erbringen können [SCHROTT, 2011].

Neben dem positiven Effekt der Umweltentlastung führt der Deponierückbau zudem zur Gewinnung von neuem Ablagerungsvolumen oder neuen Wirtschaftsflächen, die anderweitig genutzt werden könnten.

Im Vergleich zur Nutzbarmachung der Rohstoffe in Form des Landfill Minings wäre die Nachsorge der Kreismülldeponie Hechingen ins Auge zu fassen. Die gesetzlich geforderte Oberflächenabdeckung mit verschiedenen Oberflächenabdichtungssystemen, die eine nachhaltige Sicherung der Umwelt und des Deponiekörpers erreichen sollen, wobei die Dauerhaftigkeit der Abdichtungssysteme mehrere Jahrhunderte betragen soll, ist in diesem Fall bereits in großen Teilen vorhanden, sodass vor allem die jährlichen Überwachungs-, Pflege- und ggf. Sanierungskosten bei einem Abwägungsprozess ins Gewicht fallen.

Zu beachten ist hierbei jedoch, dass eine Entlassung von Deponien aus der Nachsorgephase keinen konkreten Anforderungen unterliegt bzw. im Ermessensraum der jeweils zuständigen Behörde liegt und derzeit keine fundierten Aussagen über einen realistischen Nachsorgezeitraum vorliegen.

Der Begriff des „landfill minings“ bzw. des „rohstofforientierten Deponierückbaus“ beschreibt vor diesem Hintergrund eine Möglichkeit, diesen Problemstellungen entgegenzuwirken und derzeit ungenutzte Rohstoffpotenziale zu mobilisieren sowie lokalen Rohstoff- und Energieengpässen entgegenzuwirken. Hierbei ergeben sich folgende Problem- und Fragestellungen.

PROBLEM- UND FRAGESTELLUNGEN:

Die wirtschaftliche Nutzung der Rohstoff- und Energievorräte der Kreismülldeponie Hechingen hängt im Wesentlichen von folgenden Faktoren ab:

- a) Entwicklung der Rohstoffverknappung und der Rohstoffmärkte
- b) Rohstoffgehalt und Rohstoffverteilung innerhalb des Deponiekörpers
- c) technische und umweltverträgliche Machbarkeit
- d) ökologische Wirkungen
- e) Kosten für mögliche Sanierungsmaßnahmen und die Nachsorge

Zu Punkt a:

Es wird erwartet, dass die Rohstoffmärkte dauerhaft angespannt bleiben und die Verknappung primärer Rohstoffe deutlich zunehmen wird.

Zu Punkt b:

Das Rohstoffpotenzial von Deponien in Abhängigkeit von der Nutzungsart und der Nutzungsdauer ist mit Ausnahme punktueller Untersuchungen unbekannt. Dies gilt sowohl für die Qualität als auch die Quantität der Rohstoffe sowie den Schadstoffanteil.

Zu Punkt c:

Dieser Punkt ist von besonderem Interesse, da bei der Aufbereitung deponierter Rohstoffe keine Gefährdungen für die Umwelt (Boden, Grundwasser und Atmosphäre) zu besorgen sein dürfen. Ferner muss die Aufbereitung technisch machbar und wirtschaftlich sein.

Zu Punkt d:

Mit Hilfe einer vereinfachten ökologischen Bewertung, die verschiedene Aspekte wie das Treibhausgas- und das Schadstofffreisetzungspotenzial vergleichend berücksichtigt, soll eine Abwägung vorgenommen werden.

Zu Punkt e:

Zur Abschätzung der Folgekosten der Deponienachsorge sowie für mögliche Sanierungs- und Sicherungsmaßnahmen sind entsprechende Kalkulationen aufzuführen, die einen Vergleich zur Kostenstruktur des Deponierückbaus ermöglichen.

1.1 AUFGABENSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Die Ziele dieser Arbeit sind wie folgt zu benennen:

- Ermittlung der abfallspezifischen Ablagerungsmengen der Kreismülldeponie Hechingen
- Ableitung des theoretischen Ressourcenpotenzials der Kreismülldeponie Hechingen
- Ableitung des realen Ressourcenpotenzials der Kreismülldeponie Hechingen
- Beurteilung des Rohstoffpotenzials der Kreismülldeponie Hechingen nach Art, Lage, Quantität und Qualität der vorgefundenen Ressourcen
- Aufstellung der verfügbaren Techniken, die für eine geeignete Aufbereitung deponierter Rohstoffe dienen könnten
- Bewertung der energetischen Effizienz, der Kostenstrukturen und des CO₂-Einsparpotenzials des Rückbaus der Kreismülldeponie Hechingen
- Abschätzung der Folgekosten der Deponienachsorge der Kreismülldeponie Hechingen
- Gegenüberstellung der Kosten und des Nutzens des Rückbaus der Kreismülldeponie Hechingen unter definierten Randbedingungen.

Insgesamt wird durch die formulierten Aufgabestellungen das Ziel der ganzheitlichen Bewertung des Rückbaus der Kreismülldeponie Hechingen erreicht. Zudem ist es möglich, die Frage zu beantworten, unter welchen Randbedingungen die umweltverträgliche Aufbereitung und Nutzung deponierter Ressourcen wirtschaftlicher sowie nutzeneffizienter sein könnte, als die alternativ notwendige Deponienachsorge.

2 STAND DER FORSCHUNG

2.1 DEPONIERÜCKBAU

Der Prozess des landfill minings kam bereits vor mehr als 50 Jahren erstmals zum Einsatz. Das 1953 realisierte Projekt des Rückbaus einer Deponie der Stadt Tel Aviv (Israel) belegt zudem die Wirtschaftlichkeit solcher Vorhaben. Die relativ einfache Aufbereitung des Abfallkörpers durch ein Privatunternehmen, welches mit der Stadt Tel Aviv einen Vertrag über die Nutzung der Deponie abgeschlossen hatte, erfolgte mittels Trommelsieb und nachgeschalteter manueller Sortierung des Überkorns. Die Vertragsbedingungen sahen vor, dass das Privatunternehmen für jeden aufbereiteten Kubikmeter Bodenmaterial 1,18 USD an die Stadt zahlt. Das gewonnene meist humose, bodenähnliche und nährstoffreiche Unterkorn konnte zur Bodenverbesserung auf Obstplantagen eingesetzt werden und erbrachte Verkaufserlöse in Höhe von 3,36 bis 3,90 USD pro Kubikmeter. Das Vorhaben war somit für beide Seiten äußerst lukrativ [SHUVAL, 1958].

Einer der größten Verfechter des landfill minings dieser Zeit war Professor McGauhey der Universität Kalifornien in Berkeley, USA. Bereits in den sechziger Jahren wies er auf Fachtagungen darauf hin, dass Deponien zukünftige Rohstofflagerstätten darstellen, die es zu nutzen gilt [SAVAGE ET AL., 1993].

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

Ende der neunziger Jahre befanden sich in den USA und Kanada etwa 40 landfill-mining-Projekte in unterschiedlichen Stadien der Durchführung. Zudem wurden erste Gesundheits- und Sicherheitsbestimmungen sowie Analyseverfahren für den Deponierückbau definiert [HOGLAND ET AL., 2004].

In Europa und Asien gewann das landfill mining Mitte der achtziger Jahre ebenfalls an Bedeutung. In Osteuropa, Indien und China wurden vorwiegend Deponien der Eisen- und Stahlindustrie rückgebaut, um die darin enthaltenen Metalle zu gewinnen [KRUG, 2008]. Erste Erfahrungen beim Rückbau von Siedlungsabfalldeponien wurden in Deutschland im Jahr 1993 mit der Durchführung des Pilotprojekts auf der Deponie Burghof gemacht [HOGLAND ET AL., 2004]. Auch in Italien [COSSU ET AL., 1995], Holland [VAN DER ZEE ET AL., 2004] und Schweden [HOGLAND ET AL., 2004] ist landfill mining in der Zwischenzeit praktiziert worden.

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

Deponien für das landfill mining profitabel genutzt werden können. Laut KURIAN ET AL. [2003] ist der Erfolg des landfill minings im Wesentlichen von folgenden Einflussgrößen abhängig:

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

Allein in Deutschland besteht aufgrund der historischen Entwicklungen in der Abfallwirtschaft ein enormes Angebot an potenziellen Rückbauobjekten. Allerdings wäre es aus Kosten- und Zeitgründen unwirtschaftlich alle Deponien hinsichtlich ihres Ressourcenpotenzials detailliert zu untersuchen.

VAN DER ZEE ET AL. [2004] versuchen diese Problematik über einen „step-wise“ Ansatz zu lösen, der auf einer einfachen Kosten-Nutzen-Analyse basiert. Die zu erwartenden Kosten und der versprochene Nutzen werden dabei in Abhängigkeit regionaler Gegebenheiten definiert und gewichtet. Die Konzeption des Ansatzes sieht vier Teilschritte vor, wobei nach jedem Schritt die Auswahl potenzieller Deponien aufgrund steigender Selektionstiefe verringert wird.

Wie in einem Pilotprojekt in den Niederlanden gezeigt wurde, ermöglicht diese Herangehensweise eine schnelle, effiziente und zudem kostengünstige Charakterisierung profitabler Deponiestandorte.

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

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

Ziel des ersten Schrittes ist es zum einen die rückzubauende Deponie bzw. den rückzubauenden Teilbereich einer Deponie hinsichtlich der Lage, der geologischen Gegebenheiten, der Größe und der Rückbaumenge zu charakterisieren, sowie daraus resultierende Aufbereitungsraten abzuschätzen. Zum anderen sollte in dieser Planungsphase eine erste Potenzialanalyse stattfinden, die Prognosen über die zu erwartenden verwertbaren und nicht verwertbaren Stoffgruppen liefert.



ABBILDUNG 1: TEILSCHRITTE DER DEPONIEERKUNDUNG IN HINBLICK AUF DEREN EIGNUNG ZUM LANDFILL MINING [EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1997]

Im zweiten Schritt werden, die zuvor gewonnenen Informationen in einen ökonomischen Kontext gerückt. Hierbei ist ein Großteil des ökonomischen Nutzens eher indirekt angesiedelt und von anlagenspezifischen Faktoren abhängig. Folgende Punkte sollten berücksichtigt werden:

- Steigerung der Ablagerungskapazität
- Kostenvermeidung oder –reduzierung (z.B. durch Deponieschließung, verringerten Nachsorge- und Überwachungsaufwand, Aufnahme zusätzlicher Abfälle und verminderte Sanierungspflicht)
- Betriebseinnahmen (z.B. durch Recyclingprodukte, heizwertreiche Fraktionen und nutzbares bodenähnliches Material)
- Folgenutzung der gewonnenen Fläche

Demnach gilt es in dieser Phase,

- die gegenwärtige Deponiekapazität und die zu erwartende Deponienachfrage,
- die Kosten der Deponieschließung und Deponieerweiterung,
- die aktuellen und zukünftigen Kosten des Deponiebetriebes bzw. der Nachsorge,
- die Entwicklung des Marktes und der Preise für Recyclingmaterialien
- sowie den Wert der gewonnenen Fläche

zu analysieren und abzuschätzen.

Im folgenden Schritt gilt es die rechtlichen Rahmenbedingungen und Durchführbarkeit des Rückbauvorhabens zu charakterisieren. Neben den benötigten Genehmigungen sollte auch auf mögliche Förderungen von staatlicher Seite Wert gelegt werden. Am Ende dieser Phase sollte ein Rahmenplan bereit stehen, der den Aufwand des Deponierückbaus beschreibt.

Anschließend wären die Arbeitssicherheit und mögliche Sicherheitsrisiken zu benennen und zu bewerten. Das Ergebnis ist ein Arbeitsschutz- und Sicherheitsprogramm.

Im letzten Einzelschritt müssen die Projektkosten erörtert werden. Hierbei sind neben den Planungskosten auch Kapital- sowie Betriebskosten anzurechnen.

Nach jedem der bisher genannten Schritte sollte eine Abschätzung der Projektbeteiligten über die Machbarkeit des Deponierückbaus durchgeführt werden. Sollte diese nicht gegeben sein, erübrigen sich die Folgeschritte.

Am Ende des Ansatzes steht die Gesamtabstimmung, also das Abwägen der Kosten und des damit verbundenen Nutzens.

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

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

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

verfolgt [BRAMMER ET AL., 1997]. Aufgrund des Ablagerungsverbots für unvorbehandelte Abfälle hat das Aufkommen des abzulagernden Abfalls stark abgenommen, sodass die Ziele der Kapazitätenerweiterung augenblicklich wenig Relevanz besitzen.

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

In Hinblick auf die Fragestellung der Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen aus Deponien spielt die Wertschätzung bzw. der Marktpreis des jeweiligen Rohstoffs eine entscheidende Rolle. Aktuelle Studien prognostizieren auf Basis einer rasant steigenden Weltbevölkerung und unter Beachtung von stetiger Exploration sowie technischem Fortschritt eine Verschärfung des Weltmarkts für industriell genutzte Rohstoffe. Es ist zu erwarten, dass die unterschiedlichen Faktoren zu einer exponentiellen Rohstoffverknappung mit entsprechenden Preissteigerungen führen werden. Außerdem wird sich die Gewinnung von Primärrohstoffen auf wenige Länder und Konzerne konzentrieren [FRONDEL ET AL., 2005; BUCHHOLZ, 2008; BGR - BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE, 1999].

Die genannten Randbedingungen führen dazu, dass in naher Zukunft ein Deponierückbau zur Gewinnung von Rohstoffen aus marktwirtschaftlichen Gesichtspunkten interessant wird.

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

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

Metalle und 70 bis 90 % für Kunststoffe. Höhere Rückgewinnungsquoten und Reinheitsgrade erfordern generell eine komplexere Aufbereitungstechnik [CARDIFF UNIVERSITY, 2004].

2.1.1 RECHTLICHE GRUNDLAGEN

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

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

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

Deponierückbauvorhaben sind in der Regel eine wesentliche Änderung des Betriebes einer Deponie oder der Deponie selbst. Sie müssen daher nach § 31 Absatz 3 des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes genehmigt werden [HARMS-KREKELER, 1996; KOCH & HARMS-KREKELER, 1997; DIECKHOFF & PRACK, 1995; DIECKHOFF & PRACK, 1994]. Hier heißt es,

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

- *die Errichtung und der Betrieb einer unbedeutenden Deponie beantragt wird, soweit die Errichtung und der Betrieb keine erheblichen nachteiligen Auswirkungen auf ein in § 2 Abs. 1 Satz 2 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung genanntes Schutzgut haben kann, oder*
- *die wesentliche Änderung einer Deponie oder ihres Betriebes beantragt wird, soweit die Änderung keine erheblichen nachteiligen Auswirkungen auf ein in § 2 Abs. 1 Satz 2 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung genanntes Schutzgut haben kann, oder*
- *die Errichtung und der Betrieb einer Deponie beantragt wird, die ausschließlich oder überwiegend der Entwicklung und Erprobung neuer Verfahren dient, und die Genehmigung für einen Zeitraum von höchstens zwei Jahren nach Inbetriebnahme der Anlage erteilt werden soll.*

Eine Plangenehmigung nach Satz 1 Nr. 1 kann nicht für Anlagen zur Ablagerung von gefährlichen Abfällen erteilt werden; für diese Anlagen kann eine Plangenehmigung nach Satz 1 Nr. 3 höchstens für einen Zeitraum von einem Jahr erteilt werden. Eine Plangenehmigung nach Satz 1 Nr. 1 kann des Weiteren nicht erteilt werden für Deponien zur Ablagerung von nicht gefährlichen Abfällen mit einer Aufnahmekapazität von zehn Tonnen oder mehr pro Tag oder mit einer Gesamtkapazität von 25.000 Tonnen oder mehr; dies gilt nicht für Deponien für Inertabfälle. Die zuständige Behörde soll ein

Genehmigungsverfahren durchführen, wenn die Änderung keine erheblichen nachteiligen Auswirkungen auf ein in § 2 Abs. 1 Satz 2 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung genanntes Schutzgut hat und den Zweck verfolgt, eine wesentliche Verbesserung für diese Schutzgüter herbeiführen.

Bei Deponien mit sehr geringem Gefährdungspotenzial kann die Genehmigung nach § 36 des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz erfolgen. Dies stellt jedoch eine Ausnahmeregelung dar, die sich im Wesentlichen auf kleine dörfliche Siedlungsabfalldeponien beschränkt [FINCK, 1999]. Das Abfallrecht definiert Anlagen zur Lagerung oder Behandlung von Abfällen, die in einem räumlich funktionellen Zusammenhang mit der Deponie stehen, als Teil der Deponie. Verfahrenstechnisch resultiert hieraus, dass Anlagen nicht neu errichtet werden, sondern die bestehende Anlage bzw. Deponie um sie ergänzt oder geändert wird. Änderungen im Rahmen des Deponierückbaus von Verfahrensabläufen ohne Ergänzung der Anlage können ebenfalls eine abfallrechtliche Zulassung erfordern. Das Bezugsobjekt ist in diesem Fall nicht die Anlagenänderung, sondern die Betriebsänderung [HARMS-KREKELER, 1996; FINCK, 1999].

Steht die Lagerung und Behandlung der rückgebauten Abfälle nicht in einem räumlich funktionellen Zusammenhang, sprich es werden Anlagen zur Aufbereitungen an anderer Stelle errichtet oder genutzt, so ist eine zusätzliche Genehmigung dieser Anlagen nach Anlage Nummer 8 der 4. Bundesimmissionsschutzverordnung notwendig [KRUG, 2009].

Wie § 31 Absatz 3 des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes zu entnehmen ist, liegt es im Ermessen der zuständigen Behörde, anstelle eines Planfeststellungsverfahrens ein vereinfachtes Genehmigungsverfahren ohne Beteiligung der Öffentlichkeit vorzunehmen. Hierdurch entfällt zudem die nach Planfeststellungsverfahren geforderte Umweltverträglichkeitsprüfung. Voraussetzung einer solchen Einzelfallentscheidung ist, dass diese keine erheblichen Auswirkungen auf die in § 2 Absatz 1 Satz 2 des Gesetzes über Umweltverträglichkeitsprüfung genannten Schutzgüter hat.

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

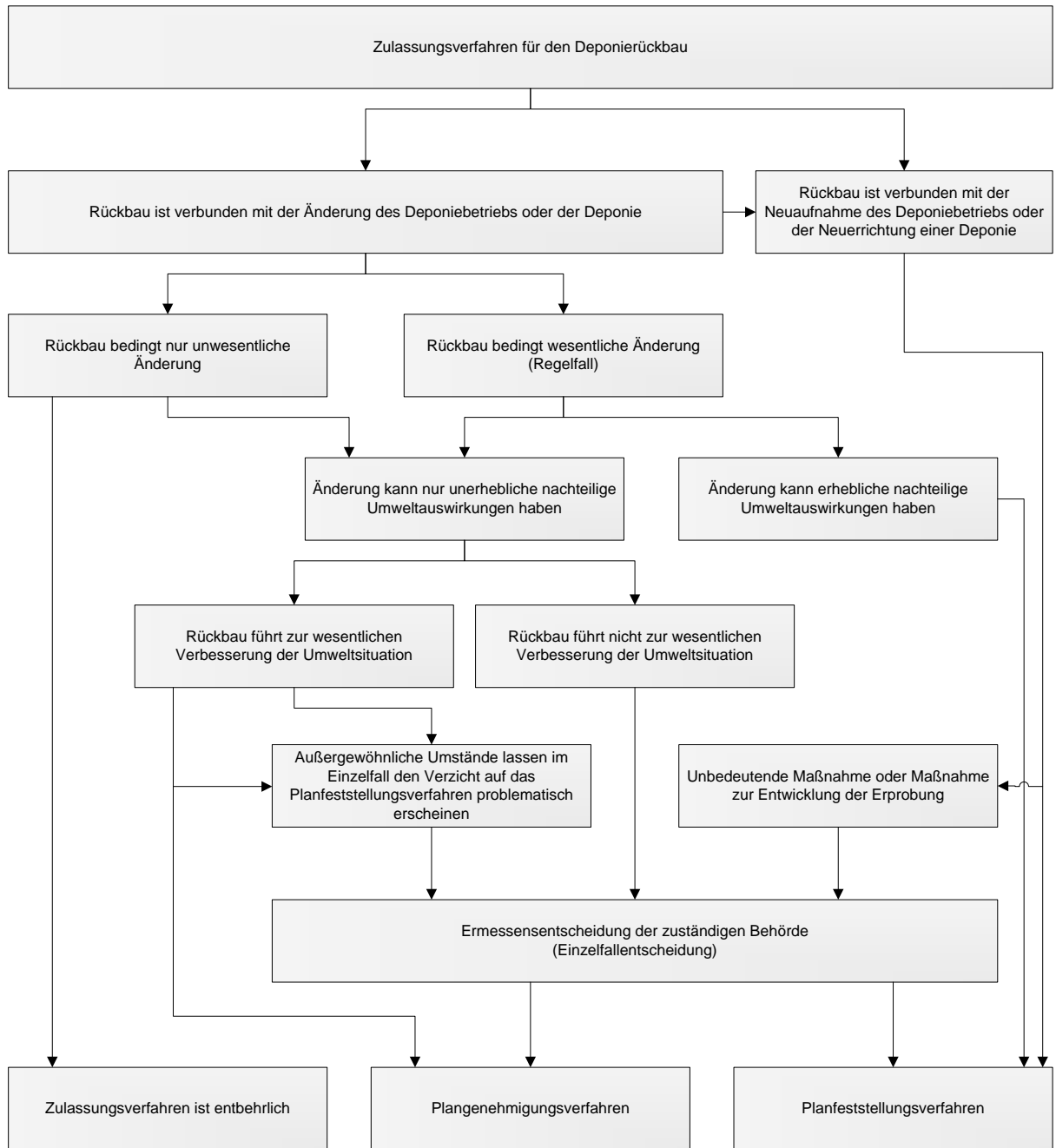


ABBILDUNG 2: ENTSCHEIDUNGSMODELL ÜBER DAS ZULASSUNGSVERFAHREN BEIM DEPONIERÜCKBAU [FINCK, 1999]

2.1.2 TECHNISCHE MÖGLICHKEITEN DER AUFBEREITUNG

Im Rahmen von Pilotprojekten - wie unter anderem der Deponie Burghof - haben sich unterschiedliche Verfahrensabläufe der Deponiegutaufbereitung bewährt. Einen Überblick über die grundlegenden Verfahrenselemente gibt Abbildung 3.

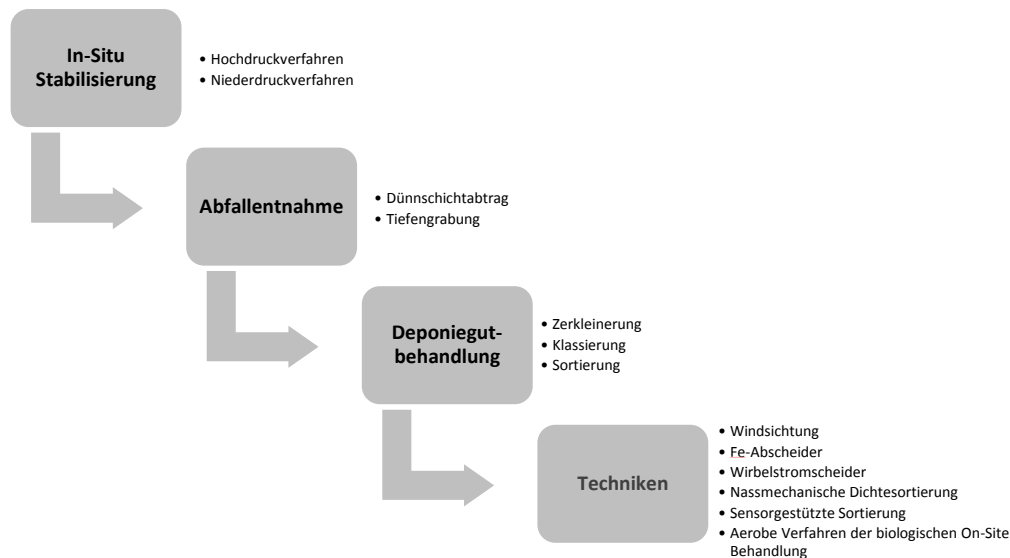


ABBILDUNG 3: GRUNDLEGENDE VERFAHRENSCHRITTE DER DEPONIEGUTAUFBEREITUNG UND TECHNIKEN DER DEPONIEGUTSORTIERUNG

Im Nachfolgenden werden in diesem Zusammenhang mögliche Aggregate der einzelnen Verfahrenselemente vorgestellt sowie deren Vor- und Nachteile in Hinblick auf die Eigenschaften des Deponieguts charakterisiert.

2.1.2.1 IN-SITU STABILISIERUNG

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

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

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

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

HOCHDRUCKVERFAHREN

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

NIEDERDRUCKVERFAHREN

In-Situ Niederdruckverfahren kommen vorwiegend zur Altlastensanierung oder als Nachsorgemaßnahme jüngerer Deponien zum Einsatz. Über das meist vorhandene Deponiegasbrunnensystem wird dabei einerseits aktiv Luftsauerstoff in den Deponiekörper eingebracht und andererseits die entstehende Überschussluft über entsprechende Gasbrunnen abgesaugt und anschließend behandelt. Der vergleichsweise geringe Lufteintrag erfolgt bei geringen Drücken von 0,1 - 1,5 bar [PRANTL ET AL., 2006A & 2006B].

In Abhängigkeit der gewünschten positiven Effekte und der eingesetzten Variante des Niederdruckverfahrens sind unterschiedlich lange Behandlungszeiten unumgänglich. Für die Geruchsstabilisierung haben sich Behandlungszeiträume von 4 – 8 Tagen als ausreichend erwiesen. Für die gezielte Trocknung des Deponieguts müssen jedoch Behandlungszeiten von 4 - 8 Wochen eingerechnet werden. Das Ziel der gleichzeitigen Reduktion der noch im Deponiekörper vorhandenen organischen Substanz bedarf sogar einer aktiven Belüftungsdauer von ca. 3 Monaten [BOTHMANN ET AL., 2002].

PRAXISANWENDUNG

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

In Praxisuntersuchungen haben sich das

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

als besonders geeignet erwiesen.

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

Praktische Erfahrungen mit dem Rotte-Filter-Verfahren konnten bei einem Rückbauprojekt auf der Deponie Burghof gewonnen werden. Hierbei wurde der entsprechende Deponiebereich 2 Wochen

vor Beginn des Aushubs einer Belüftung unterzogen. Die technische Umsetzung erfolgte über ein Raster aus 3,5 m langen Belüftungs- und Absauglanzen, die entsprechend in den Deponiekörper gerammt wurden. Über das geschaffene Belüftungssystem wurde anschließend Umgebungsluft über eine als Biofilter wirkende Rottebox angesaugt, in den Deponiekörper eingebracht und parallel abgesaugt. Durch die stündliche Änderung der Strömungsrichtung wurde die Kanalbildung im Deponiekörper und die einseitige Belastung des Biofilters verhindert.

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

Abschließend gibt Tabelle 1 eine Gegenüberstellung der wesentlichen Merkmale bzw. Unterschiede beider Stabilisierungsverfahren.

TABELLE 1: GEGENÜBERSTELLUNG DER WESENTLICHEN MERKMALE BZW. UNTERSCHIEDE DER BETRACHTETEN STABILISIERUNGSVERFAHREN

Biopuster®-Verfahren	Rotte-Filter-Verfahren
Pulsierende Druckbelüftung	Kontinuierliche Belüftung mit wechselnder Fließrichtung
Punktuelle Belüftung nur über Lanzenende	Horizontale Belüftung über die gesamte Länge der Lanze
Vorbearbeitungen notwendig; Verfilterung und Abdichtung erforderlich	Lanzen werden lediglich in den Deponiekörper gedrückt
Optionale Sauerstoffzugabe zum Luftstrom	Keine Sauerstoffzugabe

2.1.2.2 ABGRABEVERFAHREN

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

PRAXISANWENDUNG

Untersuchungen haben in diesem Zusammenhang gezeigt, dass der aktive Tiefenaushub den Vorteil des nahezu kompletten Aushubs des zuvor aerobisierten Bereichs mit sich bringt. Zur Emissions- und Geruchsminderung der abgetragenen Deponiebereiche sollte jedoch eine ca. 0,5 m dicke Schicht des bereits aerobisierten Deponieguts erhalten werden. Ein zusätzlicher technischer Vorteil dieser

Abgrabungsvariante liegt darin, dass einzelne, zumeist sperrige Deponiekörperbestandteile vorselektiert sowie separiert werden können und für den weiteren Verfahrensablauf keine Probleme verursachen.

2.1.2.3 TRANSPORT

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

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

PRAXISANWENDUNG

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

2.1.2.4 DEPONIEGUTBEHANDLUNG

Unabhängig vom Ort der Aufbereitung des Deponieguts können unterschiedliche technische Aggregate zum Einsatz kommen. Nachfolgend werden daher potenzielle Aufbereitungstechnologien hinsichtlich ihrer wesentlichen technischen Grundzüge sowie Vor- und Nachteile erläutert.

2.1.2.4.1 ZERKLEINERUNG

Einerseits wird durch die Zerkleinerung des Deponieguts eine Vergrößerung der spezifischen Oberfläche geschaffen und andererseits werden Aggregate bzw. Konglomerate unterschiedlicher Materialien aufgetrennt. Beide Aspekte sind förderlich für die weitere Stoffabtrennung [BILITEWSKI ET AL., 2000].

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

KAMMWALZENZERKLEINERER

Kammwalzenzerkleinerer eignen sich vor allem für die Aufbereitung diffus zusammengesetzter Abfälle wie bspw. Haus- und Sperrmüll, Altholz, Baumischabfall oder Biomüll. Das Funktionsprinzip dieser langsam laufenden Aggregate beruht dabei auf Zug- und Reißwirkungskräften. Ihr Aufbau sieht eine oder zwei mit Zähnen ausgerüstete Walzen vor, die durch Rotation und in Verbindung mit hydraulisch ausweichbaren Gegenrosten eine Zerkleinerung des Materials herbeiführen. Durch das mögliche Wegklappen des hydraulisch gesteuerten Gegenrostes wird gewährleistet, dass bei einer Blockade des Systems nahezu keine Störausfälle auftreten.

Der Vorteil eines Kammwalzenzerkleinerers liegt in seiner selektiven Zerkleinerungswirkung, die

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

SCHNECKENMÜHLEN

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

SCHNEIDMÜHLEN UND ROTORSCHEREN

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

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

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

BACKENBRECHER

Backenbrecher haben sich in der Praxis vor allem zur Zerkleinerung von Bauschutt bewährt, da sie sich aufgrund ihres Funktionsprinzips besonders gut für harte und spröde Materialien eignen. Die Zerkleinerung des Materials findet dabei zwischen zwei oszillierenden Brechbacken statt, wobei das Material in den meisten Fällen von oben aufgegeben wird. Die gewünschte Endkörnung des Outputmaterials lässt sich durch Variation der Abstände zwischen den beiden Brechbacken einstellen [BILITEWSKI ET AL., 2000].

Tabelle 2 zeigt abschließend die wesentlichen Einsatzgebiete der genannten Zerkleinerungsaggregate in der Abfallwirtschaft.

TABELLE 2: EINSATZGEBIETE VON ZERKLEINERERN IN DER ABFALLAUFBEREITUNG [Kranert & Cord-Landwehr, 2010]

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

2.1.2.4.2 KLASSIERUNG

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

Im Rahmen des Deponierückbaus sollte der Klassierung ein besonders hoher Stellenwert beigemessen werden. Der Grund hierfür liegt darin, dass das Rückbaumaterial mit vergleichsweise niedrigen Investitionen und technisch geringem Aufwand der weiteren Verwertbarkeit sowie der damit verbundenen Aufbereitungstechnik zugeführt werden kann. Ziel sollte es daher sein, spezifische Klassierschnitte zu wählen, die eine optimale Trenngenauigkeit der entstehenden Fraktionen (Unter-, Mittel- und Überkorn) gewährleisten und somit einerseits die Möglichkeit bieten, bereits verwertbare Stoffströme abzutrennen und andererseits die Effizienz der weiteren Materialtrennung bzw. -aufbereitung zu verbessern.

TROMMELSIEBE

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

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

SPANNWELLENSIEBE

Spannwellensiebe basieren auf verformbaren Siebböden, die aus Gummi oder Kunststoff gefertigt sind und sich auf gegeneinander angeordneten sowie bewegenden Kippträgersystemen bewegen. Durch die wellenartige Bewegung der Siebfläche und hohe Schwingungszahlen wird dabei eine Klassierung des Aufgabematerials erreicht. Zusätzlich wird hierdurch das Material über die Siebfläche transportiert und aufgelockert [FRICKE ET AL., 2002].

Die bevorzugten Trennbereiche dieser Siebe liegen im Bereich von 1–30 mm. Einsatz finden Spannwellensiebe daher oftmals in der Aufbereitung von Kompost, Feinmüll und vorzerkleinertem Elektronikschrott [KRANERT & CORD-LANDWEHR, 2010].

Beim Rückbauprojekt der Deponie Burghof konnten Erfahrungen mit einem Sternsieb gemacht werden. Ziel dieser Aufbereitungsmethode war die Gewinnung einer Fein- (< 20 mm) und Mittelfraktion (20–60 mm). Insgesamt hat sich gezeigt, dass das eingesetzte Sieb zwar eine gute Auflockerungswirkung besaß, jedoch die gewünschte Trenngenauigkeit nicht erzielt wurde. Dies resultierte letztlich auch aus der starken Verschmutzung der Wellen durch das zumeist feuchte Deponiegut [RETTENBERGER, 1998].

SCHWINGSIEBE

In einem schwingenden Rahmen gefasste Siebbeläge bilden das wesentliche Element von Schwingsieben. In Abhängigkeit der Bauform des Antriebs wird zwischen Linear- und Kreisschwingsieben unterschieden [KRANERT & CORD-LANDWEHR, 2010].

Schwingsiebe können als Ein- oder Mehrdecksiebe aufgebaut sein, was die Abtrennung mehrerer Kornfraktionen über ein komplexes Aggregat ermöglicht. Entscheidend für die Güte der Trennung sind einerseits die Eigenschaften des aufgegebenen Materials und andererseits die Sieblänge. In der Praxis werden Schwingsiebe vorzugsweise zur Klassierung von Materialien < 80 mm wie bspw. Bauschutt, Schlacken, Altglas oder Elektronikschrott eingesetzt [KRANERT & CORD-LANDWEHR, 2010].

Im Rahmen des Rückbaus der Deponie „Am Jägerberg!“ wurde das gewonnene Deponiegut mittels Schwingsieb in eine Fein- (< 35 mm), Mittel- (35–80 mm) und eine Grobfraktion (> 80 mm) klassiert. Anschließend wurde die Mittelfraktion einer Schwerguttrennung zugeführt. Die hierzu eingesetzte Steinfaller, also letztlich ein schnell laufendes Förderband mit stufenlos regulierbarer Geschwindigkeit,

erwies sich insgesamt als geeignet, da lediglich 10 Vol.-% an Störstoffen im abgetrennten Schwergut vorzufinden waren. Ebenso hat sich der Einsatz eines Spannwellensiebs zur weiteren Aufbereitung des Bandüberlaufs der Steinfaller bewährt. Selbst bindiges Material führte hier zu keinen Verstopfungen des Aggregates und somit zu einer optimalen Trennleistung [LERCH ET AL., 2010]. Ähnliche Erfahrungen wurden auch beim Rückbauprojekt auf der Deponie Burghof gemacht [RETTENBERGER, 1998].

BALLISTISCHE SEPARATOREN

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

- Obere Kante: Leichtfraktion (heizwertreich)
- Untere Kante: Schwerfraktion
- Siebrückstand: Feinfraktion

Erfahrungen mit dem Einsatz eines ballistischen Separators zur Aufbereitung von Deponiegut konnten im Rahmen eines Rückbauprojekts auf der Deponie Burghof gemacht werden. In diesem Fall diente das Aggregat zur Klassierung der zuvor gewonnenen Grobfraktion. Die Ergebnisse dieses Versuchs zeigen eine hervorragende Trennleistung des Aggregats bei gleichzeitig außerordentlich gutem Reinheitsgrad der gewonnenen heizwertreichen Leichtfraktion [RETTENBERGER, 1998].

BEWEGTE ROSTE

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

Stangenroste bzw. so genannte Stangensizer bestehen aus einem Siebkasten, in dem mehrere Siebdecks kaskadenförmig hintereinander angeordnet sind. Jedes Siebdeck selbst setzt sich dabei aus mehreren Einzelstangen zusammen, die über eine Quertraverse parallel zueinander eingebaut sind. Der Stangenabstand bestimmt in diesem Zusammenhang die gewünschte Trenngröße der einzelnen Siebdecks. Als Antriebsmodul der Roste werden in der Regel Unwuchtmotoren eingesetzt, die zudem eine Eigenvibration der Stangen hervorrufen und somit eine Verbesserung der Trennleistung aufweisen. Dies bedingt eine sehr gute Auflockerung und effiziente Trennung der Materialien sowie einen nahezu verstopfungsfreien Verfahrensablauf dieser Aggregate. Von Nachteil ist die Tatsache, dass aufgrund der technischen Ausführung der Roste längliche und flächige Materialien größerer Abmessung zwischen den Stangen hindurchrutschen und somit in das Unterkorn gelangen. Daher werden diese Aggregate in der praktischen Anwendung zur Separation grober Bestandteile aus Bauschutt und Gewerbeabfall eingesetzt [KRANERT & CORD-LANDWEHR, 2010].

Versuche von FRIEDMANN & ZOLLNER [1995] mit rückgebautem Deponiegut zeigen, dass Stangensiebe im Vergleich zu Trommelsieben im ersten Siebdurchgang einen erheblichen Vorteil bieten. Hierbei

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

Der Aufbau von Rollenrosten sieht eine Vielzahl, in gleichen Abständen parallel angeordnete Wellen vor, die mit runden, polygonförmigen oder sternförmigen Walzen oder Scheiben belegt sind. Durch die Stellung der Walzen bzw. Scheiben zueinander ergeben sich hieraus quadratische oder rechteckige Öffnungen, über die das Unterkorn ausgetragen wird. Die Walzenabmessung sowie die Wellenabstände bestimmen in diesem Zusammenhang die Größe der Rostöffnung und somit die Größe des Unterkorns. Das entsprechende Überkorn wird durch die gleichgerichtete Drehrichtung der Walzen zur Austragsseite transportiert und separiert. Generell zeichnen sich Rollenroste durch ihre geringe Verstopfungsanfälligkeit aus, weshalb sie in der Praxis insbesondere zur Klassierung von siebschwierigen, klumpenden und feuchten Materialien wie bspw. Kompost, Bodenmaterial, Grünabfällen und Bauschutt eingesetzt werden [KRANERT & CORD-LANDWEHR, 2010].

Abschließend veranschaulicht Tabelle 3 die bei unterschiedlichen Rückbauprojekten gewählten Klassierschnitte. Diese bewegen sich bei einer einstufigen Klassierung zwischen 30 und 40 mm bzw. bei einer zweistufigen Klassierung zwischen 16 und 40 sowie 30 und 80 mm.

TABELLE 3: SIEBDURCHGÄNGE AUSGEWÄHLTER DEPONIERÜCKBAUPROJEKTE

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

2.1.2.4.3 SORTIERUNG

WINDSICHTUNG

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

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

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

EISEN-ABSCHIEDER

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

WIRBELSTROMABSCHIEDER

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

Das wichtigste Trennkriterium stellt hierbei die Kornzusammensetzung des zu trennenden Materials dar, die im Bereich von 1 – 150 mm liegen sollte. Des Weiteren sollte zur optimalen Trennleistung das Inputmaterial als gleichmäßige Einkornschicht, also flächig bei gleichzeitig geringer Schichtdicke, vorliegen, was bspw. über eine vorgeschaltete Schwingförderrinne erreicht werden kann. Die Praxis

zeigt zudem, dass die vorhergehende Entfernung von Eisen-Metallen eine Verbesserung des Trennvorgangs hervorruft [KRANERT & CORD-LANDWEHR, 2010].

NASSE DICHESORTIERUNG

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

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

STATISCHES SCHWIMM-SINK-VERFAHREN

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

TRENNUNG IM ZENTRIFUGALFELD

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

SENSORGESTÜTZTE SORTIERUNG

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

NAHINFRAROT-SORTIERUNG

Die bekannteste und weit verbreitete sensorgestützte Sortiertechnik ist die Nahinfrarot-Sortierung (NIR-Sortierung), wobei die Erkennung unterschiedlicher Materialien auf deren spezifischen Spektren beruht. Hierbei wird mittels eines speziellen Sensors das jeweilige Spektrum erfasst und mit einer Datenbank abgeglichen. Diese ermöglicht es, unterschiedliche Stoffgruppen zu identifizieren und anschließend gezielt über bspw. Luftimpulse zu separieren. Der sortierbare Korngrößenbereich von NIR-Sensoren liegt zwischen 20 und 250 mm, wobei vor allem dunkle Materialien schwieriger zu

trennen sind. Dies beruht darauf, dass von ihnen eine sehr geringe Reflektion ausgeht und eine Sensorerkennung nicht möglich ist [KRANERT & CORD-LANDWEHR, 2010].

RÖNTGENZEILENSENSOR

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

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

INDUKTIONSSORTIERSYSTEM

Dieses System eignet sich vorwiegend für den Bereich der Metallaufbereitung, wobei die einzelnen Metalle über spezielle Sensoren mittels magnetischer Induktion erkannt werden. Anschließend werden die erfassten Metalle durch einzeln ansteuerbare Druckluftdüsen ausgeblasen und somit separiert [STEINERT ELEKTROMAGNETBAU GMBH, 2003].

Induktionssortiersysteme erreichen aufgrund ihrer hohen Sensitivität sehr gute Trennleistungen bei gleichzeitig tiefer Trennschärfe [KOHaupt, 2007].

OPTISCHE SORTIERUNG

Bei der Farbsortierung von Materialien wird anhand optischer Merkmale wie Farbe, Transparenz und Glanz oder geometrischer Abmessungen eine Trennung der Stoffe herbeigeführt. Die Erkennung erfolgt in den meisten Fällen über eine Farbzeilenkamera. Die nachgeschaltete Separation wird wiederum durch Druckluftdüsen erreicht. Entscheidend für die Trenngüte ist neben der Vereinzelung der Abfälle auf dem Sortierband auch der Verschmutzungsgrad des Materials. Das bevorzugte Einsatzgebiet dieser Aggregate liegt in der Altglas-, Altpapier- und Kunststoffaufbereitung [HABICH, 2007].

PRAXISANWENDUNG

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

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

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

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

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

2.1.2.4.4 AEROBE VERFAHREN DER BIOLOGISCHEN ON-SITE BEHANDLUNG

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

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

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

Insgesamt ist zu beachten, dass aufgrund der bereits innerhalb des Deponiekörpers stattgefundenen Abbauprozesse nur eine bedingte weitere Mineralisation möglich ist, die der einer Nachrotte ähnelt. Zudem sollte das Material während der Rotte nicht umgesetzt werden, da dies in den meisten Fällen zu einem Zusammenbruch der Mikroorganismenaktivität geführt hat. Erfahrungsberichte belegen, dass bei der aeroben Nachbehandlung von Deponiegut nur mit sehr geringen Geruchs- und Sickerwasseremissionen zu rechnen ist [WENGENROTH, 1995; SAURE ET AL., 1995].

In diesem Zusammenhang listet Tabelle 4 Prüfkriterien der Eignung von Altabfällen bzw. Deponiegut zur aeroben Nachbehandlung auf.

TABELLE 4: EIGNUNG VON ALTABFÄLLEN/ DEPONIEGUT ZUR AEROBEN NACHBEHANDLUNG [WENGENROTH, 1995]

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

- ✓ gute Eignung
✗ eher schlechte Eignung

2.2 KOSTEN DES RÜCKBAUS

Nach RETTENBERGER [2010b] betragen die spezifischen Kosten des Deponierückbaus exklusive der Transportkosten 30 - 40 €*m⁻³ Deponiegut. Unter der Annahme einer spezifischen Dichte von 1,0 Mg*m⁻³ ergeben sich Kosten in Höhe von ebenfalls ca. 30 – 40 €*Mg⁻¹ FM. Es ist jedoch davon auszugehen, dass durch natürliche und mechanische Prozesse eine Verdichtung der abgelagerten Abfälle stattgefunden hat. In diesem Zusammenhang ist anzunehmen, dass der Deponiekörper der Kreismülldeponie Hechingen eine mittlere Dicht von 1,5 Mg*m⁻³ besitzt. Demnach lagern in einem m⁻³ Deponiegut 1,5 Mg Abfall, die im Rahmen des Rückbaus wiederum aufgelockert werden und erneut eine Dichte von 1,0 Mg*m⁻³ annehmen. Die gewichtsbezogenen Rückbaukosten beziffern sich vor diesem Kontext also auf das 1,5-Fache bzw. 45 – 60 €*Mg⁻¹ Deponiegut.¹

Ausführlichere Darstellungen zur Kostenstruktur des Deponierückbaus werden unter anderem von SCHULTE [2011] sowie BÖLTE & GEIPING [2011] genannt. Hierbei können die in Tabelle 5 aufgestellten Kostenblöcke unterschieden werden.

¹ Für eine einheitliche Darstellung ist es notwendig, die von RETTENBERGER [2010b] genannten volumenbezogenen Rückbaukosten auf Massen zu beziehen. Ein Problem stellt hierbei dar, dass keine Angabe zur Dichte des nach RETTENBERGER [2010b] untersuchten Deponieguts vorliegt. Vor diesem Kontext werden die oben genannten Annahmen getroffen. Hieraus resultiert letztlich, dass die massenbezogenen Rückbaukosten um den Faktor 1,5 höher liegen. Der Vergleich zu Werten anderer Autoren zeigt in diesem Zusammenhang, dass die nach RETTENBERGER [2010b] aufgestellten spezifischen Rückbaukosten auf einem sehr niedrigen und dadurch fragwürdigem Niveau liegen.

TABELLE 5: SPEZIFISCHE KOSTEN DES DEPONIERÜCKBAUS | ABGEÄNDERT NACH BÖLTE & GEIPING [2011]

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

Für drei aufgestellte Varianten kommen BÖLTE & GEIPING [2011] zu folgenden Erkenntnissen (Näheres siehe Anhang 3):

VARIANTE 1

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

Kosten: 110 €*Mg⁻¹ rückgebautes Deponiegut

VARIANTE 2

Verbringung des gesamten Materials in die MVA

Kosten: 100 €*Mg⁻¹ rückgebautes Deponiegut

VARIANTE 3

Wiedereinbau am Standort ohne Wertstoffe

Kosten: 43 €*Mg⁻¹ rückgebautes Deponiegut

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

2.3 DEMONSTRATIONSPROJEKTE

Eine ausführliche Liste der in der Literatur bekannten und zum Teil wissenschaftlich begleiteten Deponierückbauprojekte ist unter anderem BOTHMANN ET AL. [2002] zu entnehmen. Nachfolgend werden beispielhaft die Verfahrensabläufe und Ergebnisse wesentlicher landfill mining Projekte vorgestellt.

2.3.1 DEPONIE BURGHOF

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

Die Deponie Burghof wurde seit 1978 nach dem Stand der Technik betrieben. Abbildung 4 zeigt die während des Betriebszeitraums abgelagerten Anteile der Abfallarten [RETTENBERGER, 1996A].

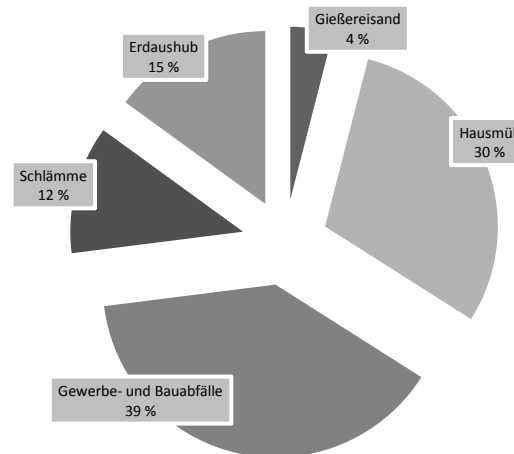


ABBILDUNG 4: ANTEILE DER AUF DER DEPONIE BURGHOF ABGELAGERTEN ABFALLARTEN [RETTENBERGER, 1996A]

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

Der Abbau geruchstabilisierter Deponieabschnitte erfolgte mittels Löffelbagger, an den sich ein Transport des Materials mittels LKWs zur Aufbereitungsanlage anschloss [GÖSCHL, 1995]. Einen Überblick der weiteren Verfahrensschritte gibt Abbildung 5, wobei eine mobile und modular erweiterbare Aufbereitungsanlage zum Einsatz kam.

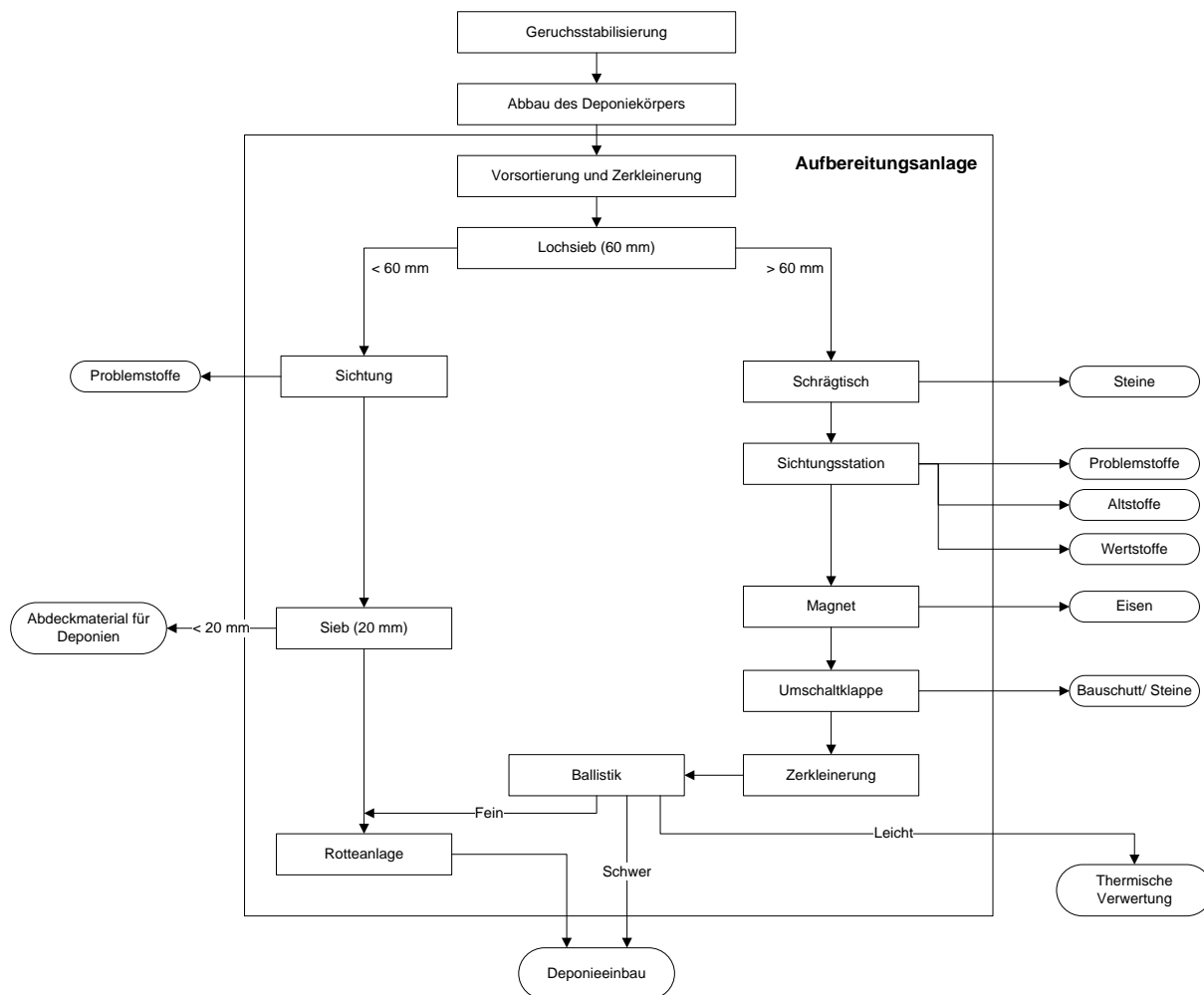


ABBILDUNG 5: VERFAHRENSCHRITTE DER DEPONIEGUTAUFBEREITUNG [RETTENBERGER ET AL., 1995]

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

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

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

wurde sie dem gleichen Verwertungsweg zugeführt. Bei der Feinfraktion aus dem Ballistikseparator handelte es sich um nur sehr geringe Mengen, die zumeist direkt wieder deponiert wurden [GÖSCHL, 1994 & 1995].

Während des einjährigen Pilotprojekts wurden insgesamt 50.000 m³ Deponiematerial ausgebaut und behandelt. Die Ergebnisse belegen nach Angaben von GÖSCHL [1995], dass durch Deponierückbau eine Volumenreduktion von mehr als 50 Vol.-% zu erreichen ist. Die für den Volumengewinn wesentliche Fraktion ist die Leichtfraktion, die mit Heizwerten von 16.000 – 22.000 kJ*kg⁻¹ und einem Volumenanteil von 51 % zur energetischen Verwertung geeignet ist. Die Fraktion < 20 mm machte ca. 13 Vol.-% des Gesamtvolumens aus und erfüllt die nach TASI geforderten Ansprüche der Deponieklasse II oder könnte ggf. mit Vorlage eines Verwendungsnachweises außerhalb von Deponien verbracht werden. Kontaminationsuntersuchungen der aussortierten Steinfraktion (etwa 10 Vol.-%) ergaben Werte, die weit unter vergleichbaren Werten der Bauschuttzubereitung lagen. Ein direkter Einsatz als Recyclingmaterial ist somit möglich. Metalle und Holz machten nur etwa 2 Vol.-% des Deponiematerials aus. Zudem zeigte sich, dass in einer 14 Jahre alten Deponie nur geringe Alterungs- und Reaktionsprozesse der Materialien auftraten.

Die Fortsetzung des Pilotprojekts fand bis 1996 mit eingeschränkter wissenschaftlicher Begleitung statt. Innerhalb der drei Projektjahre wurden insgesamt 120.000 m³ Abfall ausgekoffert und behandelt. Der mit 79 Gew.-% mengenmäßig bedeutendste Anteil entfiel dabei auf die Feinfraktion < 60 mm, welche nach einer biologischen Vorbehandlung wieder abgelagert wurde. Die thermisch verwertbaren Komponenten wie Holz, Textilien und die kunststoffhaltige Leichtfraktion machten 17 Gew.-% aus. Die stofflich verwertbaren Metalle, Steine und Kunststoffe besaßen einen Anteil von 4 Gew.-%. Neben der stofflichen und energetischen Verwertung sorgte die verbesserte Einbautechnik dafür, dass etwa 50 % des Deponievolumens eingespart werden konnte.

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

Die Gesamtkosten für den Rückbau beliefen sich umgerechnet auf ca. 165 € pro m³ Deponiegut. Diese, im Vergleich zum regulären Rückbau, hohen Kosten sind auf die durchgeführten Optimierungsversuche bei der Aufbereitung zurückzuführen. Bei voller Auslastung der Anlage hätten die Kosten um mehr als die Hälfte niedriger gelegen [RETTENBERGER ET AL., 1995]. Der Anlagendurchsatz ist somit ein wesentlicher Faktor, der die Wirtschaftlichkeit von Rückbauprojekten beeinflusst.

UNTERSUCHUNGEN ZUR ABFALLBESCHAFFENHEIT

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

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

- Besonderheiten

In Bezug auf die Deponiegutzusammensetzung ist dabei festzuhalten, dass die untersuchten Deponiegutproben sehr unterschiedliche Anteile der oben genannten Fraktionen aufzeigen. Nach STEGMANN [2010] ist dies darauf zurück zu führen, dass der Deponiekörper neben typischen Siedlungsabfällen auch andere Abfälle wie bspw. Bauschutt beinhaltet, die unterschiedliche Eigenschaften besitzen und ebenfalls im Rahmen der Untersuchungen beprobt wurden.

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

Die ermittelten Gasbildungspotenziale über 21 Tage (GB_{21}) ermöglichen Aussagen zur zukünftigen Deponiegasproduktion, also zum Restgehalt an noch vorhandenen, biologisch abbaubaren Bestandteilen im Deponiekörper. Unter Berücksichtigung, dass das gesamte Deponiegaspotenzial um etwa 30 – 50 % höher liegt als die Ergebnisse des Standardversuchs, kann dieses mit $15 - 30 \text{ m}^3 \cdot \text{Mg}^{-1}$ abgeschätzt werden. Die Ergebnisse der Eluatanalysen zeigen in Bezug auf vergleichbare Siedlungsabfalldeponien erhöhte Konzentrationen auf. Dies gilt vor allem für die Parameter Leitfähigkeit, DOC, Chlorid, Phenolindex, Ammonium, CSB und BSB₅ [STEGMANN, 2010].

2.3.2 ZENTRALDEPONIE DÜSSELDORF HUBBELRATH

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

Seit 1972 betreibt die Stadt Düsseldorf die Bauschuttdeponie Hubbelrath, die mit einem Abfallvolumen von ca. 4,5 Mio. m³ nahezu vollständig verfüllt ist. Dies gab der entsorgungspflichtigen Körperschaft den Anlass, die Rückbaufähigkeit und den daraus resultierenden Volumengewinn zu untersuchen. Unter Rückbau wird hierbei neben der einfachen Umlagerung der Abfälle auch die Abtrennung und Nutzung verwertbarer Fraktionen verstanden.

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

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

Für quantitative Analysen wurde pro Meter Bohrtiefe eine Mischprobe hergestellt, die auf pH-Wert, Leitfähigkeit, Wassergehalt, Glühverlust und die Anteile der Stoffarten Schluff, Sand, Kies, Steine, Asche, Schlacke, Beton, Holz, Kunststoffe, Gummi, Sperrmüll, Isoliermassen, Bitumenmasse, Hausmüll, Glas sowie Metalle untersucht werden sollte. Aufgrund der bei den Bohrungen

gewonnenen Erkenntnisse, dass einzelne Stoffarten wie bspw. Bitumen- und Isoliermasse lediglich in vernachlässigbaren Mengen auftraten, konnte der Stoffgruppenkatalog auf acht Fraktionen begrenzt werden. Die Ergebnisse der quantitativen Untersuchungen sind Abbildung 6 zu entnehmen.

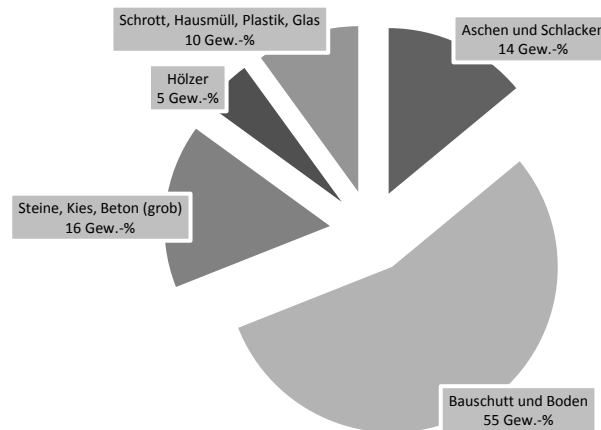


ABBILDUNG 6: ZUSAMMENSETZUNG DES DEPONIEGUTS DER ZENTRALDEPONIE HUBBELRATH

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

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

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

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

Die insgesamt gewonnenen Ergebnisse weisen ein mittleres bis hohes Rückbaupotenzial für die Zentraldeponie Hubbelrath aus. Die Verdichtung dieser Erkenntnis sowie die Sammlung von Erfahrungen des Anlagenbetriebs wurden durch die Durchführung eines großtechnischen Versuchs erzielt. Hierbei wurden rund 30.000 m^3 Deponiegut ausgebaut und einer mehrstufigen Aufbereitung unterzogen. Eine schematische Darstellung des eingesetzten Aufbereitungsschemas gibt Abbildung 7. Auf eine ausführliche Darstellung wird an dieser Stelle verzichtet, da ausschließlich einfache Techniken zur Klassierung der Materialströme zum Einsatz kamen.

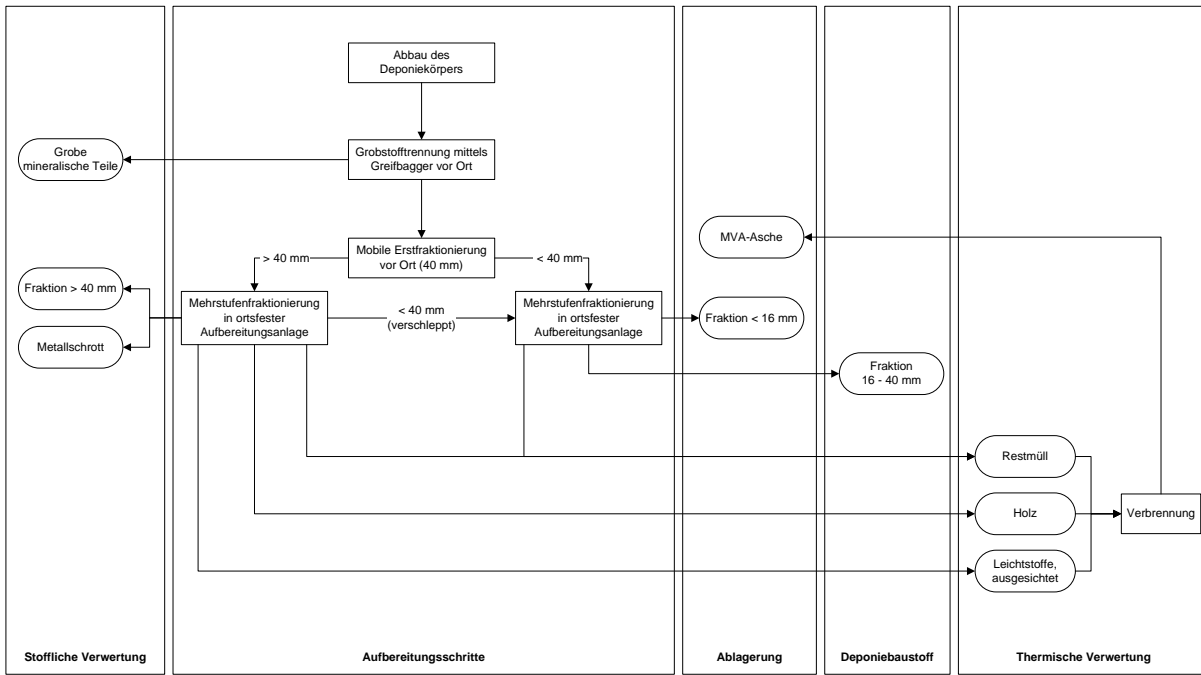


ABBILDUNG 7: VERFAHRENSABLAUF BEIM RÜCKBAUprojekt AUF DER ZENTRALDEPONIE HUBBELRATH [HÜTLER & WISKEMANN, 1995]

Wie die Ergebnisse des großtechnischen Versuchs zeigen, konnten trotz einfacher Aufbereitung etwa 75 % der umgelagerten 30.000 m³ Deponiegut einer Verwertung zugeführt werden. Dabei entfallen Metallschrott, Materialien > 40 mm und grobe mineralische Teile mit etwa 35 % auf die stoffliche Verwertung. Leichtstoffe, Holz und Hausmüll können thermisch verwendet werden. Sie machen insgesamt einen Anteil von ca. 16 % aus. Die übrigen 23 % gehören der Fraktion 16 – 40 mm an. Diese können als Deponiebaustoffe einer Verwertung zugeführt werden.

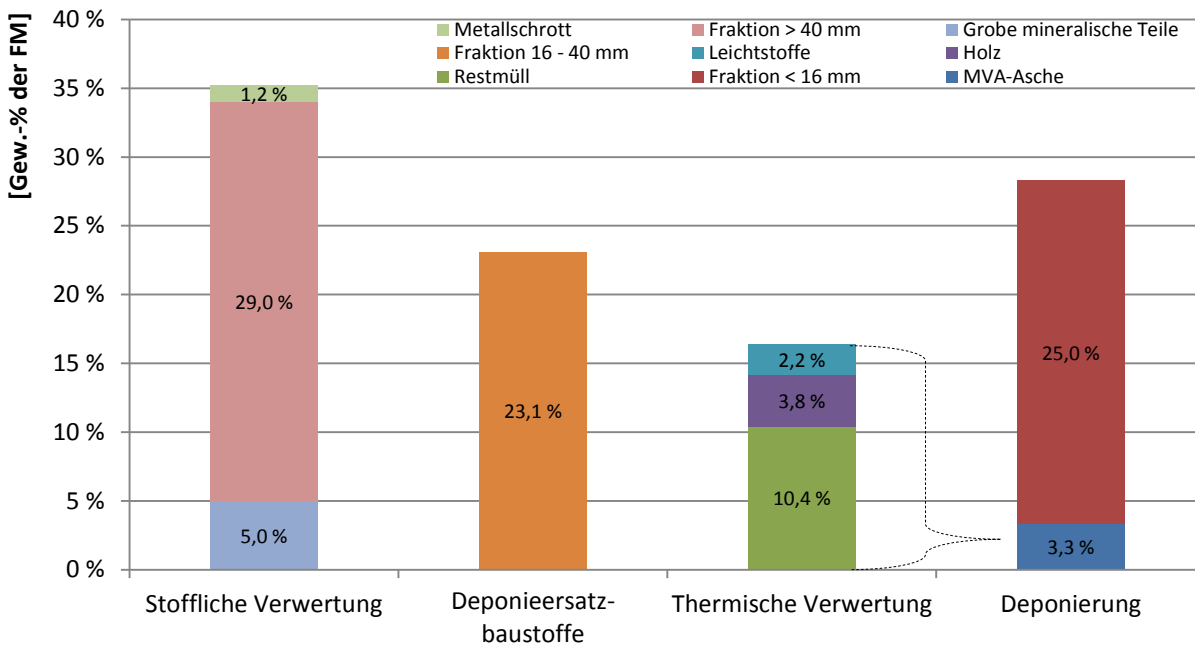


ABBILDUNG 8: MITTLERE DEPONIEGUTZUSAMMENSETZUNG UND DEREN VERWERTUNGS- SOWIE ENTSORGUNGSOPTIONEN [HÜTLER & WISKEMANN, 1995]

2.3.3 HESSISCHE DEPONIEN ALS ROHSTOFFLAGERSTÄTTEN

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

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

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

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

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

Die Zentraldeponie Kirschenplantage besitzt eine Fläche von 28 ha und wird bereits seit den fünfziger Jahren betrieben. Der sogenannte Altteil wurde bis 1989 verfüllt und macht etwa 9 ha der Gesamtfläche aus. In diesem Bereich sind die abgelagerten Abfälle hinsichtlich ihrer Menge und Zusammensetzung nicht bekannt. Aufgrund geometrischer und topographischer Gegebenheiten gehen die Autoren der Studie von einer Ablagerungsmenge von 1 bis 1,2 Mio. m³ aus. Über die Zusammensetzung des nach 1989 eingebauten Abfalls existieren hingegen relativ exakte Aufzeichnungen.

Abbildung 9 zeigt die abgeschätzten Stoffmengen, die im Zeitraum von 1973 bis 2005 auf der Deponie abgelagert wurden. Dabei ist zu beachten, dass bei der Berechnung von einem Abbau der organischen Substanz in Höhe von 50 % ausgegangen wird. Auffallend an der spezifischen Abfallzusammensetzung sind die hohen Mineralien- und Organikanteile, die zusammen etwa 60 % der Gesamtmenge ausmachen. Die hochkalorische Kunststofffraktion bestimmt mit rund 10 % bzw.

207.000 Mg maßgeblich die Wertigkeit des Deponiematerials. Metalle machen rund 4 % der vorgefundenen Stoffgruppen aus. Sie setzen sich zu rund 85 % aus Eisenmetallen, 13 % aus NE-Metallen und 2 % Aluminium zusammen.

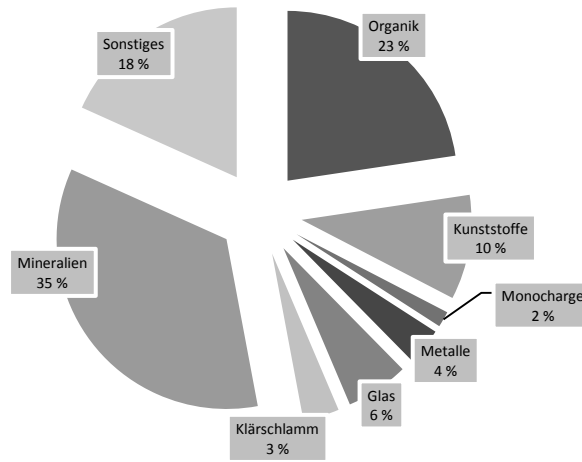


ABBILDUNG 9: ABGELAGERTE STOFFSTRÖME AUF DER DEPONIE KIRSCHENPLANTAGE FÜR DEN ZEITRAUM 1973 BIS 2005 - NETTOMENGEN NACH ERFOLGTEM FÜNFZIGPROZENTIGEM ORGANIKABBAU

Die prognostizierte prozentuale Verteilung der Stoffgruppen über alle elf hessischen Deponien wird aus Abbildung 10 ersichtlich. Zu beachten ist, dass der starke Anstieg des Mineralienanteils darauf zurückzuführen ist, dass auf einer der Deponien überproportional viel Erdreich abgelagert wurde.

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

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

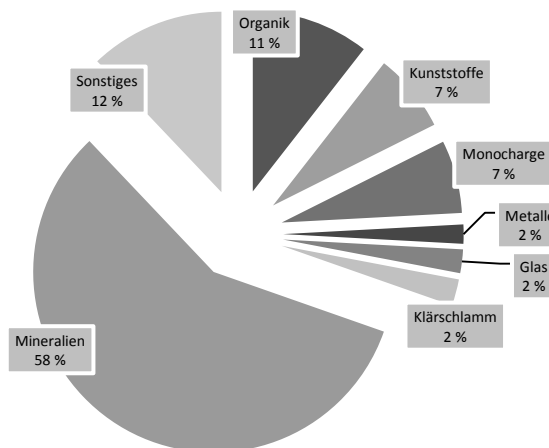


ABBILDUNG 10: KUMULIERTE FRAKTIONSANTEILE DER 11 HESSISCHEN REFERENZDEPONIE FÜR DEN ZEITRAUM ZWISCHEN 1972 UND 2005 - NETTOMENGEN NACH ERFOLGTEM FÜNFZIGPROZENTIGEM ORGANIKABBAU

2.3.4 DEPONIE DEIDERODE

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

Die kombinierte Bauschutt-, Haus- und Gewerbeabfalldeponie Deiderode wurde von 1972 bis 1987 vom Landkreis Göttingen betrieben. Die darin abgelagerten ca. 900.000 m³ Abfall sollten aufgrund von Erweiterungsmaßnahmen und der Anpassung an den aktuellen Stand der Technik in zwei Teilschritten umgelagert werden.

Im ersten Teilbereich wurden ca. 477.000 m³ Abfall umgelagert. Dabei erfolgte vor der eigentlichen Umlagerung mittels Bagger und Dumper eine Be- und Entlüftung des Deponiekörpers, um Geruchs- und Gasemissionen zu minimieren und die Arbeitssicherheit zu gewährleisten. Die Untersuchungen im Rahmen der ersten Teilfläche ergaben zusammengefasst folgende Ergebnisse:

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

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

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

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

2.3.5 VERBUNDVORHABEN DEPONIEKÖRPER

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

Im Rahmen des Teilvorhabens „Emissionsverhalten umweltrelevanter Schadstoffe in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Abfalls und der Standzeit der Deponie“ bildeten Feststoffuntersuchungen einen Schwerpunkt der Arbeiten. Zur Charakterisierung des Stoffpotenzials wurden mittels Bohrungen Feststoffe aus dem Deponiekörper entnommen und analysiert. Die Darstellung der jeweiligen Untersuchungsergebnisse in Abhängigkeit des entsprechenden Alters der Abfälle ermöglichte zudem die Abbildung zeitlicher Entwicklungen sowie Besonderheiten. Insgesamt wurden sieben verschiedene Deponien beprobt, wobei Abfälle aus einem Zeitraum von etwa 35 Jahren untersucht werden konnten. Tabelle 6 gibt einen Überblick über die spezifischen Deponiecharakteristika [DOHMANN, 1997].

TABELLE 6: DEPONIECHARAKTERISTIKA DES VERBUNDVORHABENS DEPONIEKÖRPER [DOHMANN, 1997]

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

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

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

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

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

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

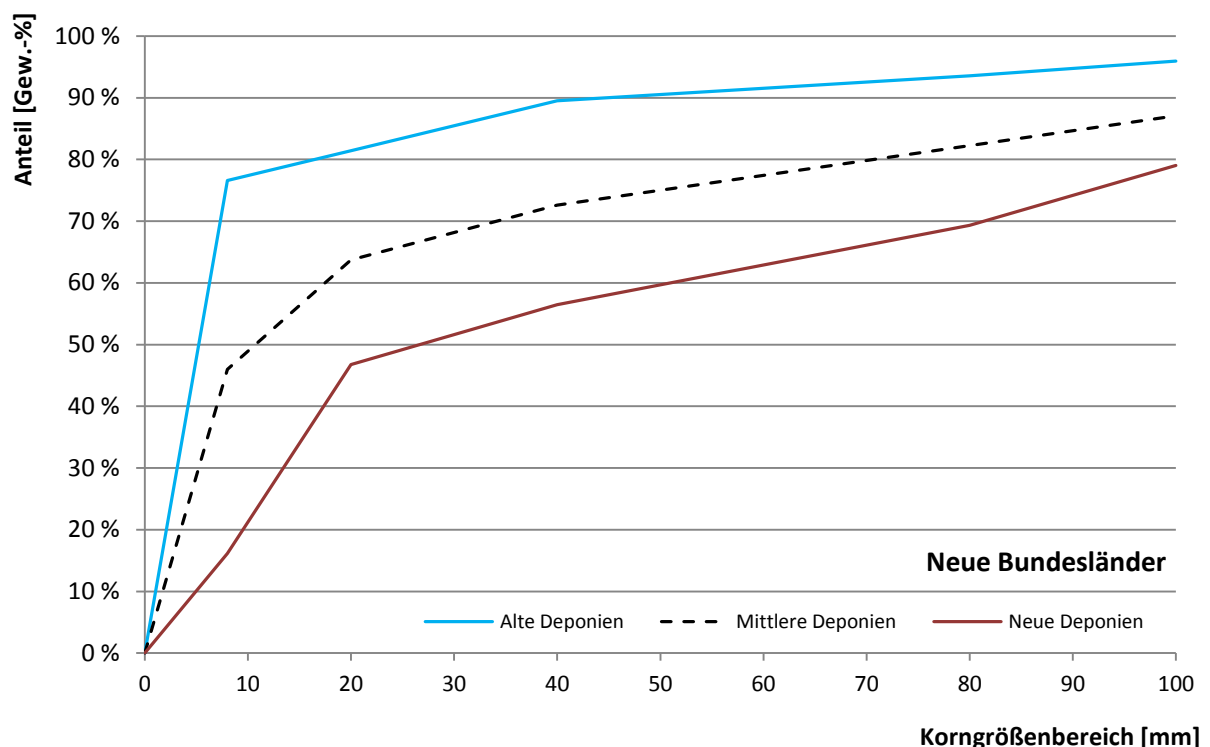


ABBILDUNG 11: KORNGRÖßENVERTEILUNG OSTDEUTSCHER DEPONIEIN ABHÄNGIGKEIT DES DEPONIEALTERS [EHRIG UND BRINKMANN, 1998]

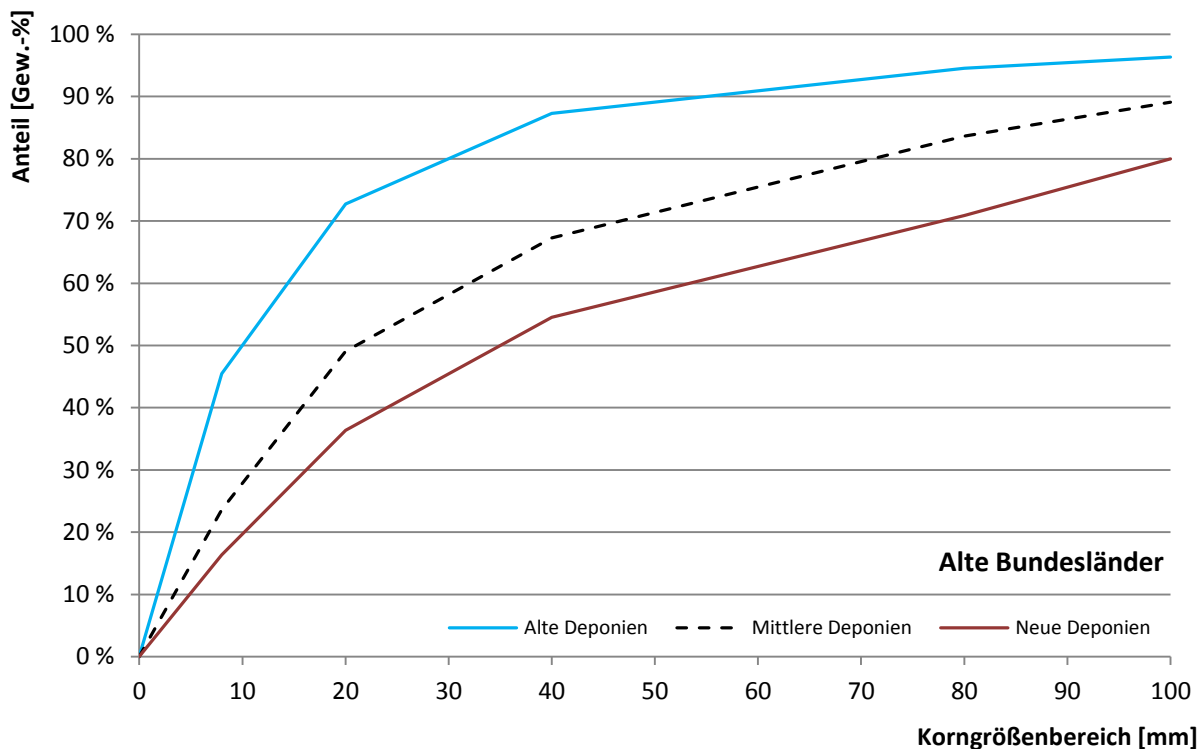


ABBILDUNG 12: KORNGRÖßENVERTEILUNG WESTDEUTSCHER DEPONIEGÜTTER IN ABHÄNGIGKEIT DES DEPONIEALTERS [EHRIG UND BRINKMANN, 1998]

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

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

2.3.6 DEPONIE RENNEROD

Der Abfallwirtschaftsbetrieb Westerwald betreibt seit 1973 eine Hausmülldeponie nahe der Stadt Rennerod, die im Jahr 1975 den geordneten Betrieb aufnahm. Bis 1996 wurden auf der insgesamt 12 ha großen und nicht basisgedichteten Deponiefläche ca. 800.000 m³ Abfälle abgelagert. Im Rahmen der Erweiterungsplanungen in den achtziger Jahren wurde ein Sanierungskonzept integriert, das den geordneten Rückbau und die Errichtung eines Abdichtungssystems dieses Altbereichs vorsah [GROß, 1998].

Die im Rahmen der Sanierungsplanung durchgeführten Voruntersuchungen zeigen dabei nachfolgende Ergebnisse. Auf Basis von Mitarbeiterbefragungen und alter Aufzeichnungen konnte

die ungefähre Zusammensetzung des Deponiekörpers in Abhängigkeit definierter Abfallarten rekonstruiert werden. Wie Abbildung 13 zu entnehmen ist, setzt sich der Deponiekörper zu etwa 35 Gew.-% aus Hausmüll, 10 Gew.-% Gewerbeabfall und 10 Gew.-% Sperrmüll zusammen. Die übrigen 45 Gew.-% werden durch Erdaushub und Bauschutt beschrieben.

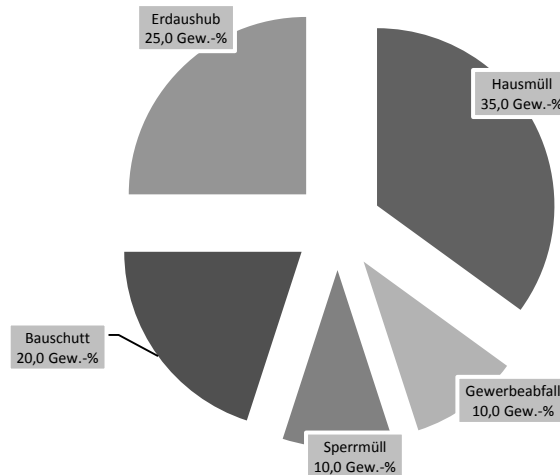


ABBILDUNG 13: ABSCHÄTZUNG DER ZUSAMMENSETZUNG DES DEPONIEKÖRPERS RENNEROD | VORUNTERSUCHUNG [GROß, 1998]

Durch repräsentative Probegrabungen und anschließende Sortierung mittels semimobiler Baustellenabfallsortierungsanlage ergab sich für die Deponie Rennerod die in Abbildung 14 dargestellte Deponiegutzusammensetzung. Aufgrund des hohen Anteils an bauschuttähnlichen Materialien sowie Inertstoffen wurde die Zielsetzung der Aufbereitung und Verwertung auf diese Stofffraktionen gesetzt. Untersuchungen zur gezielten Abtrennung einer heizwertreichen Leichtfraktion mittels Windsichter sowie Klassierungen des Deponieguts kommen zu den in Abbildung 15 dargestellten Ergebnissen. Es zeigt sich, dass die heizwertreiche Fraktion einen Anteil von ca. 24 Gew.-% ausmacht [GROß, 1998].

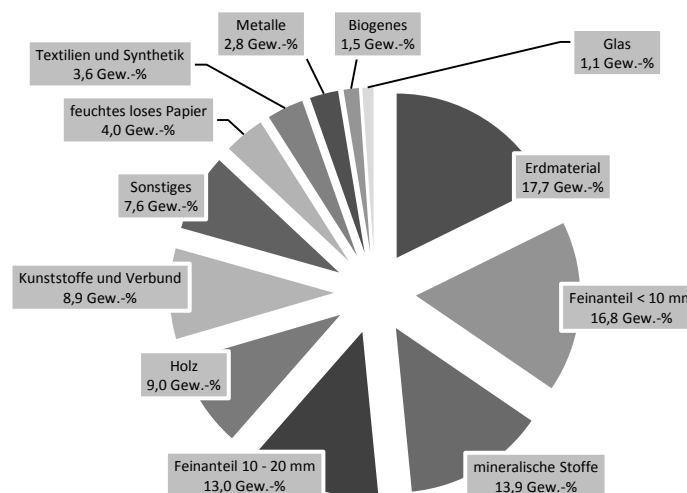


ABBILDUNG 14: ZUSAMMENSETZUNG DES DEPONIEGUTS RENNEROD | VORUNTERSUCHUNG [GROß, 1998]

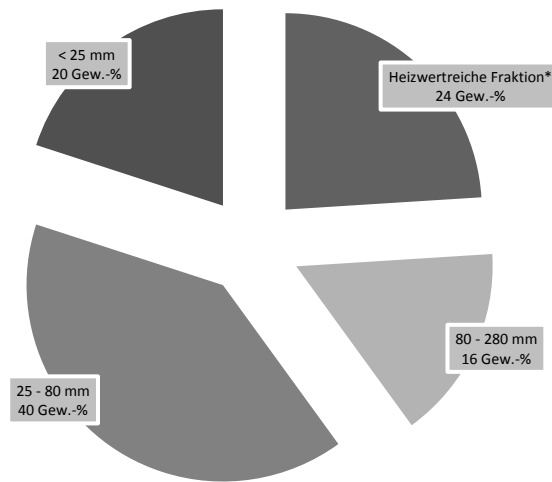


ABBILDUNG 15: KORNGRÖßENVERTeilUNG UND ANTEIL HEIZWERTREICHER STOFFFRAKTIONEN DES DEPONIEGUTS RENNEROD | VORUNTERSUCHUNG [GROß, 1998]

Auf Basis dieser Ergebnisse und weiterführender Laboruntersuchungen wurde das in Abbildung 16 schematisch dargestellte Aufbereitungskonzept erstellt und in den Jahren 1996 bis 1997 entsprechend 130.000 m³ Deponiegut behandelt. Das Alter des Deponieguts ist dabei mit 8 - 15 Jahren anzusetzen [GROß, 1998].

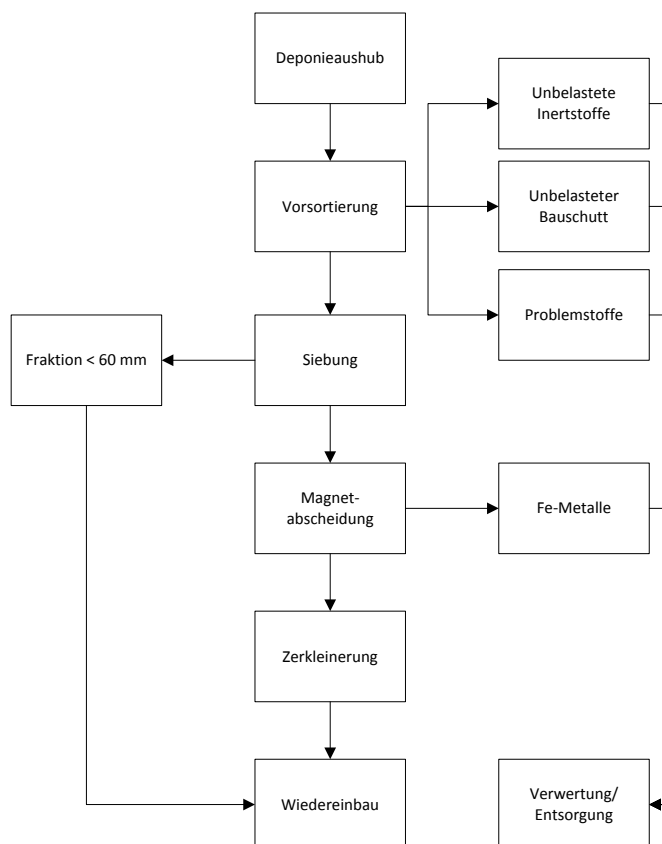


ABBILDUNG 16: AUFBEREITUNGSKONZEPT DES ERSTEN BAUABSCHNITTS DER DEPONIE RENNEROD AUF BASIS DER VORUNTERSUCHUNGEN [GROß, 1998]

Die Ergebnisse der Untersuchung werden aus Abbildung 17 ersichtlich. Sowohl gewichts- als auch volumenbezogen stellen erdähnliche Materialien den größten Anteil dar. Nach GROß [1998] belegen die Ergebnisse deutlich, dass die Abtrennung einer heizwertreichen Fraktion (Kunststoffe, Papier, Leichtfraktion, Textilien) eine deutliche Verringerung des Deponievolumenbedarfs verursacht. Metalle zeigen mit 3,2 Gew.-% bzw. 3,1 Vol.-% einen zu anderen Untersuchungen vergleichbaren Wert auf.

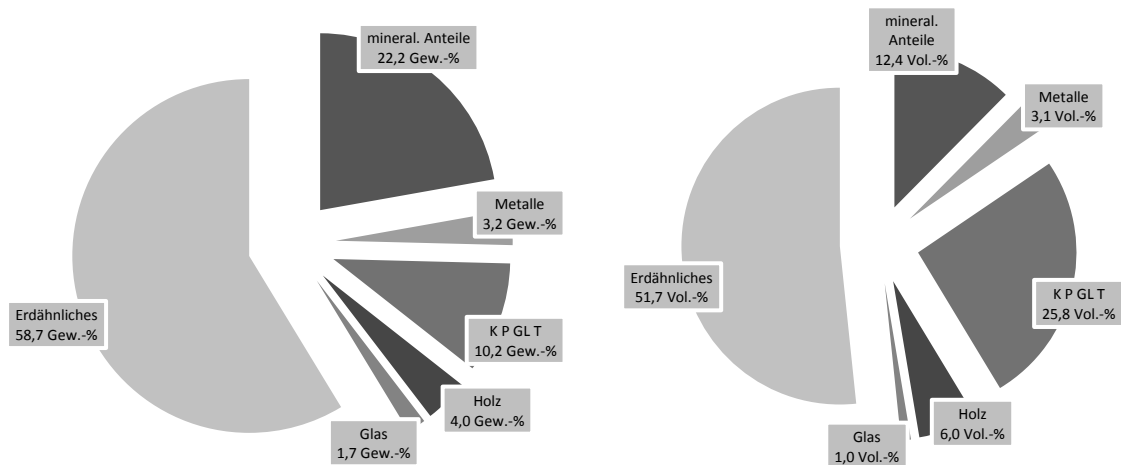


ABBILDUNG 17: ZUSAMMENSETZUNG DES RÜCKBAUMATERIALS DER DEPONIE RENNEROD NACH STOFFGRUPPEN IN GEW.- UND VOL.-% (HOCHRECHNUNG NACH [GROß, 1998])

(K P GL T) = HEIZWERTREICHE FRAKTION MIT $H_u > 11 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

2.3.7 WERTSTOFFPOTENZIAL IN ABFÄLLEN RÜCKGEBAUTER HAUSMÜLLDEPONIE

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

Die Proben sind hinsichtlich ihres Alters wie folgt zu charakterisieren:

1. Probe: Deponierung im Jahr 1986
2. Probe: Deponierung im Jahr 1987
3. Probe: Deponierung im Jahr 1998

Die Klassierung fand in folgende Größenklassen statt:

1. Grobfraction: > 50 mm
2. Mittelfraction: 20 – 50 mm
3. Feinfraction: < 20 mm

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

Die Ergebnisse der händischen Sortierung der Grob- und Mittelfraktion sind Tabelle 7 zu entnehmen. Es ist zu beachten, dass sich die gemachten Angaben jeweils auf die einzelnen Fraktionen beziehen, wobei die Grobfraktion im feuchten Zustand und die Mittel- sowie Feinfraktion im getrockneten Zustand betrachtet wird.

TABELLE 7: SORTIERANALYSEERGEBNISSE DER GROB- UND MITTELFRAKTION [CHRIST ET AL., 2011]

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

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

Nach Tabelle 7 sind wertgebende Kunststoffe überwiegend in der Grobfraktion vorzufinden. Metalle finden sich hingegen durchaus in beiden Fraktionen wieder und erreichen sogar Anteile von bis zu 8,6 Gew.-% der TM.

TABELLE 8: KONZENTRATIONEN SELTENER ERDEN IN GROB-, MITTEL- UND FEINFRAKTIONEN AUS DEM DEPONIERÜCKBAU [CHRIST ET AL., 2011]

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

Die in Tabelle 8 aufgeführten Analysenergebnisse zum Vorkommen von Seltenen Erden im Deponiegut zeigen, dass eine ganze Reihe der Stoffe in allen Fraktionen nachzuweisen ist, wobei vor allem Cerium, Neodym, Praseodym und Gadolinium in höheren Konzentrationen auftraten [CHRIST ET AL., 2011].

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

2.4 DEPONIEPROZESSE

Hausmülldeponien enthalten aufgrund ihrer Ablagerungshistorie zum Teil noch große Mengen an organischer Substanz. Bei biologischen Umwandlungsprozessen entstehen hieraus Emissionen, die über den Luft- oder Wasserpfad ausgetragen werden. Dabei hängt die Geschwindigkeit und Dauer des Abbaus und Austrags maßgeblich von biologischen, chemischen und physikalischen Faktoren sowie deren Wechselwirkungen ab [NARANJO, 2004]. Zudem hat der Deponiebetrieb wesentlichen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der Deponiegasproduktion [BOGON, 2005].

2.4.1 GASHAUSHALT

Unter dem Begriff Gashaushalt wird im Allgemeinen die zeitabhängige, qualitative und quantitative Betrachtung der Größen Gasproduktion, Gasableitung, Gasumwandlung und Gasadsorption zusammengefasst. Dabei ergibt sich nach FRANZIUS [1982] die Deponiegasproduktion aus der Aufsummierung der genannten Größen.

Deponiegas bezeichnet in diesem Zusammenhang die im Deponiekörper durch mikrobielle Um- und Abbauprozesse gebildeten gasförmigen Stoffwechselprodukte, soweit diese nicht gelöst werden, sowie die in die Gasphase übergegangenen abgelagerten Stoffe [RETTENBERGER, 1995]. Es besteht zu etwa 99 % aus den Hauptkomponenten Methan, Kohlendioxid und Stickstoff [GERINGSWALD, 2001]. Die Produktion von Deponiegas basiert auf folgenden Prinzipien:

- der mikrobiellen Umwandlung organischer Substanzen,
- dem Übergang gelöster, adsorbierter oder fester Stoffe in die Gasphase und
- der chemischen Reaktion abgelagerter Stoffe untereinander sowie mit Niederschlags- und Sickerwasser.

Dabei stellt die Umwandlung organischer Substanzen durch Mikroorganismen den mengenmäßig bedeutendsten Gasbildungsprozess dar [RETTENBERGER & MEZGER, 1992]. Nach MUDRACK & KUNST [1985] ist die organische Substanz in die Gruppen der Kohlenhydrate, Proteine und Lipide einzuteilen, die aeroben und anaeroben Abbauprozessen unterliegen.

2.4.1.1 AEROBER ABBAU

Unter Anwesenheit von Sauerstoff setzen aerobe Mikroorganismen (z.B. Bakterien, Einzeller, Pilze) organische Ausgangsstoffe in niedermolekulare, energieärmere Produkte um. Verläuft der Abbau

vollständig, entstehen unter Freierwerdung von Energie und Wärme Kohlendioxid (CO₂) und Wasser (H₂O) als Endprodukte. Dabei steht den Mikroorganismen der gesamte Energiegehalt des abgebauten Materials für ihre Lebensprozesse zur Verfügung, woraus ein vergleichsweise rascher Aufbau von Biomasse resultiert [KALTSCHMITT & HARTMANN, 2009].

Die Abbaugeschwindigkeit wird im Wesentlichen von der Qualität und Quantität des abzubauenen organischen Materials, physikalisch-chemischen Umweltfaktoren und dem genetischen Potential der Mikroorganismen bestimmt [JANKE, 2002]. In Bezug auf die biologische Abbaubarkeit des organischen Materials ist nach THOMÉ-KOZMIENSKY [1985] zwischen

- leicht abbaubaren (Zucker, Stärke, Hemicellulosen, Proteine),
- mittelschwer abbaubaren (Zellulose, Fette, Eiweiße),
- schwer abbaubaren (Lignine, Keratine) und
- nicht abbaubaren bzw. biologisch inerten (Kohle, Koks, Gummi, Leder sowie Kunststoffe)

Verbindungen zu unterscheiden.

2.4.1.2 ANAEROBER ABBAU

Wie Abbildung 18 verdeutlicht, erfolgt ein weiterer Weg der biochemischen Umsetzung organischer Verbindungen über die 4 Stufen des anaeroben Abbaus. Diese sind:

- Hydrolyse (Bakterien wie Clostridien, Bacillen etc., z.T. Archaeen)
- Acidogenese (Bakterien wie Clostridien, Bacillen, z.T. Archaeen)
- Acetogenese (syntrophe Bakterien)
- Methanogenese (Archaeen)

In der Phase der Hydrolyse werden komplexe Makromoleküle wie Kohlenhydrate, Fette und Proteine durch Exoenzyme acidogener Bakterien in ihre Bestandteile aufgespalten. Die dabei entstehenden oligo- und monomeren Verbindungen, also Zucker, Aminosäuren oder langkettigen Fettsäuren, werden anschließend von acidogenen Mikroorganismen zu organischen Säuren, niedermolekularen Alkoholen, Ammonium und Schwefelwasserstoff umgesetzt. Einige dieser Mikroorganismen sind zudem in der Lage, die Ausgangssubstrate direkt zu CO₂, H₂ und kurzkettigen Fettsäuren (Essigsäure, Propionsäure, Buttersäure) zu verarbeiten. Die Acidogenese oder auch „Saure Gärung“ ist charakteristisch für CO₂-Produktionsraten bei abnehmendem Sauerstoff- und Stickstoffangebot [RETTENBERGER, 1995].

Im Verlauf der Acetogenese bauen syntrophe Mikroorganismen die zuvor gebildeten Fettsäuren durch komplexe Reaktionen weiter zu Essigsäure, CO₂ und H₂ ab. Die Energiebilanz der meisten Reaktionen der Acetogenese hat unter Standardbedingungen einen positiven Wert. Dies bedeutet, dass die beteiligten Mikroorganismen mehr Energie investieren müssen als sie gewinnen. Wenn jedoch die Produkte aus dem vorhergehenden Prozess, hierbei vor allem H₂, von hydrogenotrophen oder methanogenen Archaeen entfernt werden, kann die Gibbs-Energie einen negativen Wert annehmen und die Acetogenese mit geringem Energiegewinn für die Mikroorganismen ablaufen [BAUER ET AL., 2009]. Somit bilden acetogene Mikroorganismen beim anaeroben Stoffabbau das Bindeglied zwischen den Prozessen der Acidogenese und Methanogenese [RETTENBERGER, 1995].

Beim Schritt der Methanogenese verstoffwechseln methanogene Archaeen die in den beiden vorhergehenden Abbauschritten gebildeten Substrate zu Kohlendioxid, Wasser und Methan. Generell ist die Methanogenese ein energieliefernder Prozess, der unter Standardbedingungen den energiezehrenden Prozess der Acetogenese ermöglichen kann.

Aus der kürzeren Vermehrungszeit acetogener Mikroorganismen im Vergleich zu methanogenen Archaeen resultiert, dass zunächst vorwiegend säureproduzierende Bakterien im Deponiekörper vorhanden sind und die Methanproduktion zeitlich verzögert einsetzt. Bei zu hohen Konzentrationen an organischen Säuren kann es dabei sogar zur Hemmung der Methanbildung kommen. In Bezug auf Abfalldeponien ist festzuhalten, dass sich nach einiger Zeit im Deponiekörper ein Gleichgewicht zwischen syntrophen Bakterien und methanogenen Archaeen einstellt [RETTENBERGER, 1995; RETTENBERGER & MEZGER, 1992; BAUER ET AL., 2009].

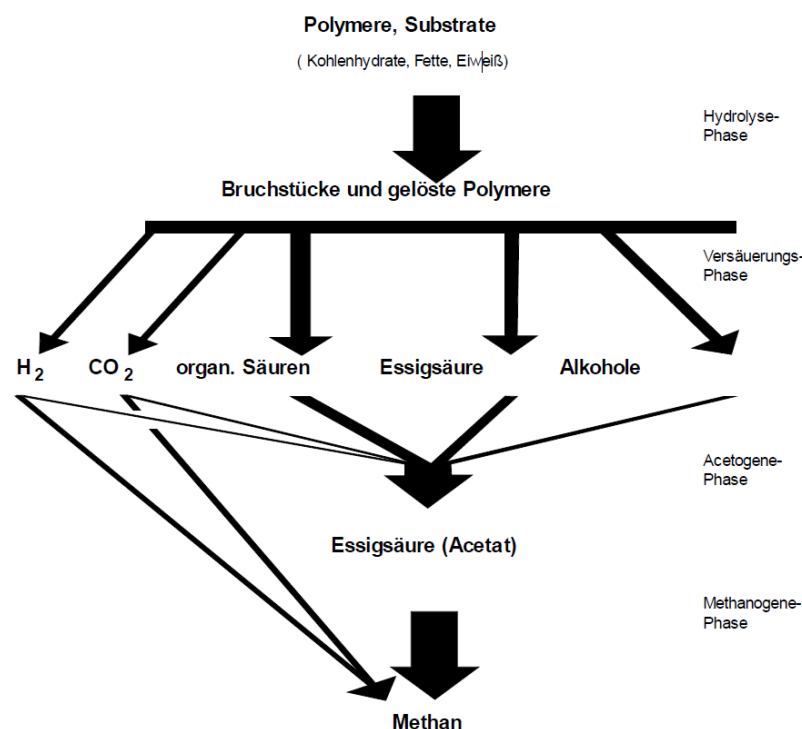


ABBILDUNG 18: SCHEMA DES MEHRSTUFIGEN ANAEROBEN ABBAUS ORGANISCHER SUBSTANZEN [BISCHOFBERGER ET AL., 2005]

2.4.1.3 ZEITLICHER VERLAUF DER DEPONIEGASPRODUKTION

Nach bisherigen Untersuchungen ist die Deponiegasproduktion und -zusammensetzung während des Abbaus von Abfällen in Abhängigkeit der Zeit in 9 Phasen einzuteilen [FARQUHAR & ROVERS, 1973; RETTENBERGER & MEZGER, 1992]. Den dabei auftretenden typischen zeitlichen Verlauf der Deponiegaszusammensetzung zeigt Abbildung 19.

Wird Abfall verdichtet abgelagert, so haben Licht und Sauerstoff nur begrenzten Zugang zum eingebauten Material. Hieraus resultiert, dass die metabolischen Prozesse nach dem Verbrauch des eingeschlossenen Sauerstoffs vornehmlich anaerob verlaufen [BILITEWSKI ET AL., 2000].

In Phase I, die auch als aerobe Phase bezeichnet wird, wird der im Porenraum des Deponiekörpers verbliebene Luftsauerstoff durch aerobe Mikroorganismen veratmet. Hierbei entstehen bis zu 20 Vol.-% CO₂, die die noch vorhandene Porenluft verdrängen. Hat die Sauerstoffverdrängung vollständig stattgefunden, geht der Abbau in die anaerobe Phase II, die so genannte Saure Gärung,

über. Diese zeichnet sich durch maximale CO₂- und H₂-Produktion in Verbindung mit der Verdrängung des Porenstickstoffs aus. Die dabei beteiligten Bakterien sind fakultativ anaerob und können somit auch bei noch vorhandenem Sauerstoff Stoffwechsel betreiben. Zudem beginnt zeitlich verzögert der Aufbau einer methanogenen Archaeenpopulation [RETTENBERGER, 1995].

Phase III charakterisiert die instabile Methanproduktion. In dieser Phase stellt sich im Deponiekörper ein Gleichgewicht zwischen syntrophen Bakterien und methanogenen Archaeen ein, wodurch die Emission von CO₂ abnimmt und im Gegenzug die Methanemission auf ihren maximalen Wert von ca. 55 – 60 Vol.-% ansteigt. Nach Einstellung des Gleichgewichts sind die Methan- und CO₂-Konzentrationen über einen langen Zeitraum konstant. Die Deponie befindet sich dann in der stabilen Methanphase IV, die sich durch ein Verhältnis von Methan zu Kohlendioxid von 1,2 bis 1,5 auszeichnet. Nach bisherigen Erkenntnissen setzt die stabile Methanproduktion unter idealisierten Bedingungen nach ein bis zwei Jahren nach Einbau der Abfälle ein [BILITEWSKI ET AL., 2000; RETTENBERGER, 1995; RETTENBERGER & DOM, 1987].

Die sich anschließende Phase V zeichnet sich im Vergleich zur stabilen Methanphase durch ein höheres CH₄ zu CO₂-Verhältnis aus, welches nach Ergebnissen von Sondenmessungen und Absaugversuchen zwischen 1,5 und 4 liegt. Sowohl für Phase IV als auch V besteht ein hohes Gefährdungspotenzial durch Deponiegasemissionen, das aus der starken Gasproduktion und dem sich daraus aufbauenden Druckgefälle zur Umgebung resultiert.

Mit abnehmender Deponiegasproduktion nimmt auch der Gasdruck im Inneren der Deponie ab, sodass O₂ und N₂ aus der Atmosphäre in die Randbereiche des Deponiekörpers eintreten. Durch die einsetzende Methanoxidation sinkt in diesen Bereichen das CH₄ zu CO₂-Verhältnis wieder. Methangehalte von 10 – 40 Vol.-%, Kohlendioxidgehalte von 5 – 30 Vol.-% sowie bis zu 30 Vol.-% N₂ sind typisch für diese Phase.

Die weiter abnehmende Deponiegasproduktion bedingt eine gesteigerte und tiefer reichende Lufteinströmung in den Deponiekörper und damit eine Verstärkung der Methanoxidationsrate. Hierdurch kommt es zu einem deutlichen Anstieg der Kohlendioxidkonzentration im Deponiegas und einer Verschiebung des CH₄ zu CO₂-Verhältnis in den Wertebereich < 1. Letztlich ist die beschriebene Deponiephase VII oder Methanoxidationsphase durch ein hohes N₂ zu O₂-Verhältnis gekennzeichnet, das aus der Oxidation des eindringenden Luftsauerstoffs resultiert. Aufgrund des nun umgekehrten Druckgefälles besteht zu diesem Zeitpunkt keine Gefahr von Emissionen aus dem Deponiekörper in die Atmosphäre.

In der so genannten Kohlendioxidphase geht der Methangehalt des Deponiegases auf Werte von 2 - 5 Vol.-% zurück. Der Kohlendioxidgehalt bleibt aufgrund der immer noch schwach stattfindenden Methanoxidation bei Anteilen von 5 – 20 Vol.-%. Neben Anteilen von etwa 60 Vol.-% Stickstoff zeigt das Deponiegas in diesem Stadium im Vergleich zu unbeeinflusster Bodenluft einen erniedrigten O₂-Gehalt von < 15 Vol.-%.

Die abschließende Deponiephase IX zeichnet sich durch den abnehmenden Kohlendioxidgehalt, als Ergebnis des weiteren Lufteindringens und des inzwischen nahezu vollständigen Abbaus der abbaubaren organischen Substanz, aus. Im Gegenzug nähert sich der Sauerstoffgehalt des Deponiekörpers Werten von 18 - 20 Vol.-%. Insgesamt ähnelt die Deponiegaszusammensetzung dieser Phase der Zusammensetzung von Bodenluft [RETTENBERGER, 1997].

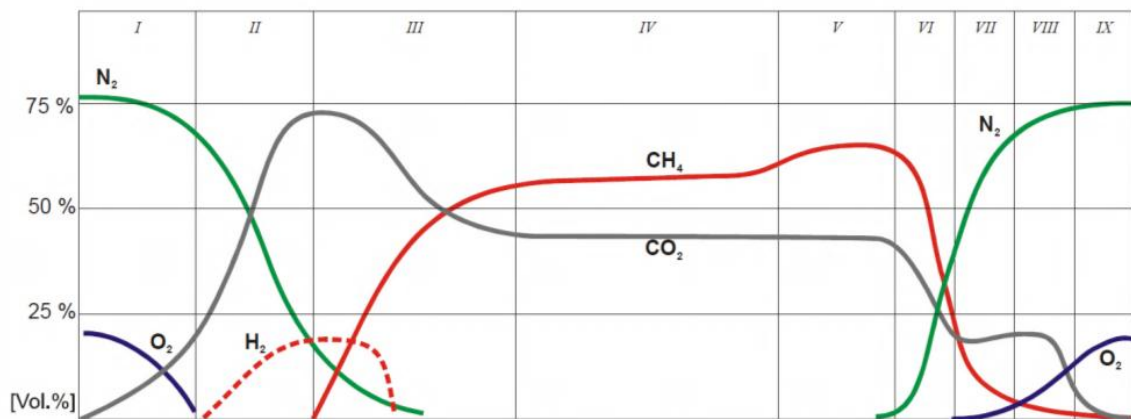


ABBILDUNG 19: ZEITLICHER VERLAUF DER DEPONIEGASZUSAMMENSETZUNG [FARQUHAR & ROVERS, 1973; RETTENBERGER & MEZGER, 1992], ENTNOMMEN [STACHOWITZ, 2004]

Abschließend ist zu berücksichtigen, dass die hier gemachten Ausführungen einen idealisierten Verlauf der Deponiegasbildung darstellen. Vor allem die Deponiegasmenge sowie die zeitlichen Spannweiten der einzelnen Deponiephasen können von Deponie zu Deponie stark variieren [RETTENBERGER, 1996B]. Wesentliche Einflussfaktoren, die den Verlauf der Deponiegasproduktion beeinflussen, werden nachfolgend erläutert. Soweit nicht separat angegeben, beziehen sich die hier gemachten Ausführungen auf RETTENBERGER [1995] sowie LFU [1992].

WASSERGEHALT

In zahlreichen Untersuchungen zur Abschätzung des Gaspotenzials von Deponien hat sich gezeigt, dass der Wassergehalt der abgelagerten Abfälle der wichtigste Einflussfaktor für die Methanbildung ist [SCHARF, 1982; HAM, 1982; DERNBACH, 1982].

Dabei bewirken im Bereich von 20 - 60 % Wassergehalt geringe Feuchtigkeitserhöhungen eine deutliche Steigerung der Methanproduktion. Bei Wassergehalten über 60 % verläuft die Methanbildung optimal, wobei solch hohe Werte im heterogenen Deponiekörper allenfalls lokal erreicht werden.

Im Normalfall besitzt der Deponiekörper oberhalb des Grundwasserbereichs Wassergehalte von 15 - 50 %, sodass Wasser einen ständig limitierenden Faktor bei der Methanproduktion darstellt.

WASSERTRANSPORT

Neben dem Wassergehalt ist die Wasserbewegung bzw. der daraus resultierende Stofftransport ein wichtiger Faktor. Die beim mikrobiellen Abbau gebildeten organischen Säuren würden bei fehlender Wasserbewegung im Deponiekörper angereichert und zu Veränderungen einzelner Parameter wie bspw. des pH-Werts führen. Diese Veränderungen beeinflussen die Milieubedingungen der nachfolgenden Abbaustufen zum Teil erheblich, wodurch es zu Abbauehemmungen oder gar dem Stillstand des Abfallabbaus kommen könnte. Somit können Sickerwasser- und Kondensatuntersuchungen in Ausnahmefällen wichtige Ergebnisse für die Beurteilung der Gasproduktion liefern.

TEMPERATUR

Der überwiegende Teil der methanogenen Mikroorganismen ist mesophil. Dies bedeutet, dass ihr optimaler Wachstumsbereich bei 20 – 45 °C liegt. Nach SPENDLIN [1991] sind Temperaturen von 30 bis 40 °C als optimal anzusehen.

Durch die entstehende Wärme beim biologischen Abbau der organischen Substanz kommt es zur Erwärmung des Müllkörpers. Hierbei hat sich gezeigt, dass durchschnittlich Temperaturen von 20 - 40 °C im Deponiekörper herrschen. Lokale Hitzenester sowie Kaltbereiche, die das Mikroorganismenwachstum und damit auch die Methanproduktion hemmen, treten dabei ebenso auf.

NÄHRSTOFF- UND SUBSTRATANGEBOT

Die Zusammensetzung von Hausmüll und Klärschlamm bietet überwiegend gute Wachstumsbedingungen für die am Abbau beteiligten Mikroorganismen. Entscheidend ist dabei vor allem der organische Abfallanteil, der von den Bakterien der Stufen I oder II des anaeroben Abbauprozesses angegriffen und gespalten werden kann. Als Substrat kommen bspw. Küchenabfälle, Gartenabfälle, Papierprodukte, tierische Abfälle, Textilien, Pilzmycel und Schlämme aus der Abwasserreinigung in Frage. Zusätzlich müssen den Mikroorganismen ausreichend Makro- und Mikronährstoffe zur Verfügung stehen. Für einen optimalen Abbau sollte das Verhältnis von CSB : N : P = 100 : 0,44 : 0,08 sein, wobei die Verfügbarkeit von Phosphor meist den limitierenden Faktor darstellt.

PH-WERT UND PUFFERSYSTEM

Zur Bildung eines Puffersystems und zur Einhaltung eines pH-Wertes im Bereich von 6 - 8 ist ein ausreichender Gehalt an CaCO₃ im Deponiekörper notwendig. Zu stark saure oder basische pH-Bereiche wirken toxisch auf die Mikroorganismen. Zudem besteht im sauren Milieu die Gefahr der Schwermetallmobilisierung. Neben dem Puffersystem des Deponiekörpers stellt der angesprochene Wassertransport einen entscheidenden Faktor zur pH-Wert Regulation dar.

TOXISCHE STOFFKONZENTRATIONEN

In der Literatur wird ein Gehalt von < 6.000 und > 15.000 mg*I⁻¹ an Gesamtfettsäuren als hemmend für das Wachstum von methanogenen Mikroorganismen angegeben [KAPP, 1984; DUARTE & ANDERSON, 1983]. Weitere wachstumshemmende Schwellenwerte sind:

- 2.500 mg*I⁻¹ NH₄-Stickstoff,
- Spuren von freiem Ammoniak,
- 0,1 mg*I⁻¹ Gesamt-Schwermetalle und
- 200 mg*I⁻¹ Sulfid-Schwefel

Im Fall der Schwermetalle ist festzuhalten, dass diese nur in gelöster Form eine hemmende Wirkung auf die Methangärung besitzen. Problematisch ist dabei vor allem gelöstes Quecksilber und Cadmium. Nach POLLER [1990] beeinflussen auch Pestizide und einige chlorierte Kohlenwasserstoffe die Methanbildung negativ.

ABLAGERUNGSTECHNIK

Einbautechnik, Zerkleinerungszustand des Abfalls und Art der Verdichtung entscheiden maßgeblich über die Porenverteilung und damit auch automatisch über den Wasser- und Lufthaushalt des Deponiekörpers.

2.4.1.4 GASPROGNOSEMODELLE

Das Deponiegaspotenzial, also die Gasmenge, die aus abgelagerten Abfällen entstehen kann, ist in erster Linie eine Funktion des im Abfall enthaltenen und abbaubaren Kohlenstoffgehalts [GERINGSWALD, 2001]. Nach RETTENBERGER [1992] ist es jene Gasmenge in m^3 , die unter deponiespezifischen Randbedingungen aus einer Tonne Abfall gebildet werden kann.

In der Literatur existieren mehrere Ansätze zur Abschätzung der Deponiegasmenge. Eine erste Grundlage zur Gasmengenabschätzung stellen in diesem Zusammenhang Faulversuche von Abfällen im Labormaßstab dar. Wie die Literaturzusammenstellung in Tabelle 9 zeigt, erreicht das Deponiegaspotenzial je nach Versuchsaufbau und -durchführung Bildungsraten von 120 - 235 $m^3 \cdot Mg^{-1}$ Hausmüll.

TABELLE 9: GASPRODUKTIONSPOTENZIAL VON HAUSMÜLL - ZUSAMMENSTELLUNG VON ERGEBNISSEN AUS LABORVERSUCHEN [RETTENBERGER & MEZGER, 1992]

Quelle	Versuchsaufbau und -durchführung	Gasproduktion in $m^3 \cdot Mg^{-1}$ feuchten Abfalls
PFEIFFER, 1974	Faulversuch mit zerkleinertem Hausmüll im Rührreaktor 4 – 30 Tage Aufenthaltszeit bei 40 °C	186
KLEIN, 1980	Faulversuch von Hausmüll gemeinsam mit Klärschlamm	235
HITTE, 1976	Faulversuch von Hausmüll gemeinsam mit Klärschlamm	204
STEGMANN, 1982	Faulversuch mit zerkleinertem Hausmüll und Sickerwasserkreislauführung bei 30 °C	120 – 150

In der Praxis hat sich nach RETTENBERGER [1992] nachfolgende Abschätzung bewährt:

FORMEL 1: PROGNOSEMODELL ZUR ABSCHÄTZUNG DER POTENZIELLEN DEPONIEGASPRODUKTION

$$G_t = M * 1,868 * C_{org} * (0,014 * T + 0,28) * (1 - 10^{-kt})$$

Mit:

- M:* Müllmenge [Mg]
G_t: bis zur Zeit *t* gebildete spezifische Deponiegasmenge [$m^3 \cdot Mg^{-1}$]
C_{org}: organischer Kohlenstoffanteil [%]
k: Abbaukonstante
T: Temperatur [°C]
t: Zeit [Jahre]

Die Anpassung dieses mathematischen Ansatzes an die Realität erfolgt dabei durch geeignete Parameterwahl, die nachkommende Aspekte berücksichtigen sollte:

C_{org} : Für Hausmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle liegt dieser Wert in Bereichen von 170 - 220 kg*Mg⁻¹. Bei der Betrachtung von Altablagerungen haben sich Werte von 150 - 200 kg*Mg⁻¹ bewährt.
Weitere Erfahrungswerte aus der Literatur für unterschiedliche Abfallarten sind Tabelle 10 zu entnehmen.

TABELLE 10: C_{org} -GEHALT UNTERSCHIEDLICHER ABFALLARTEN

Abfallart	kg C_{org} *Mg ⁻¹ Abfall
Hausmüll	200
Sperrmüll	80
Sortierreste	60
Gewerbeabfälle	90
Bauschutt	0
Erdaushub	0
Schlämme	100
Sonstiges	50

T: Der Temperaturbereich von Hausmülldeponien liegt bei 30 – 36 °C.

k-Wert: Ist eine Maßzahl für die Abbaugeschwindigkeit. Untersuchungen an Deponien deuten auf einen realistischen k-Wertebereich von 0,035 – 0,045 hin.

Durch Umstellung der Formel 1 und in Verbindung mit vorhandenen Messdaten zur Deponiegasproduktion wird es ermöglicht, Aussagen über den Abbau der organischen Substanz vorzunehmen. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass die erfasste Gasmenge deutlich geringer ist als die produzierte Gasmenge.

FORMEL 2: BERECHNUNGSGRUNDLAGE DES ABBAUS DER ORGANISCHEN SUBSTANZ

$$C_{org} = \frac{G_t}{M * 1,868 * (0,014 * T + 0,28) * (1 - 10^{-kt})}$$

Mit:

M : Müllmenge [Mg]
 G_t : bis zur Zeit t gebildete spezifische Deponiegasmenge [m^3 *Mg⁻¹]
 C_{org} : organischer Kohlenstoffanteil [%]
 k : Abbaukonstante
 T : Temperatur [°C]
 t : Zeit [Jahre]

2.4.2 WASSERHAUSHALT

Der Wasserhaushalt einer Deponie und damit verbundene Prozesse können als eine Art „Black Box System“ angesehen werden. Beeinflussende Größen sind dabei [BILITEWSKI ET AL., 1994]:

- Niederschlag
- Schmelzwasser
- Interflow
- Eigenfeuchte des Abfalls
- Evaporation
- Transpiration
- Einbauweise des Abfalls

Der Deponiekörper ist in diesem Zusammenhang als ein sehr inhomogenes Objekt anzusehen, was sehr unterschiedliche Wasserspeicherkapazitäten und Fließbewegungen bedingt. Ein häufig auftretendes Phänomen sind durch lokale Stauschichten hervorgerufene „Wasserlinsen“. Hierbei handelt es sich um nahezu wassergesättigte Zonen mit anaeroben Verhältnissen. Unterhalb dieser Stauschichten entstehen entgegengesetzt „Trockennester“, die aufgrund des fehlenden Sickerwassers nur geringe biochemische Abbauprozesse aufweisen [BILITEWSKI ET AL., 1994].

Nach BILITEWSKI ET AL. [1994] lässt sich der Wasserhaushalt einer Deponie wie folgt charakterisieren:

FORMEL 3: EINFLUSSGRÖßEN AUF DEN WASSERHAUSHALT EINER DEPONIE

$$N + W_{syn} = ETI + AO + AS + AD + \Delta R$$

Mit:

- N:* Niederschlag
W_{syn}: Differenz von gebildetem und verbrauchtem Wasser innerhalb des Abfallkörpers
ETI: Evapotranspiration
AO: Oberflächenabfluss
ΔR: zeitliche Verzögerung des Abflusses
AS: gespeichertes Wasser
AD: Dränabfluss (Sickerwasser)

Erheblichen Einfluss auf den Wasserhaushalt einer Deponie nehmen die Oberflächen- und Basisabdichtung, da hierdurch der Deponiekörper von seiner Umgebung und äußeren Einflüssen abgeschirmt wird. Nach HAARSTRICK & HEMPEL [2003] liegt der durchschnittliche Wassergehalt einer deutschen Deponie bei ca. 30 Vol.-%.

2.5 NACHSORGEKONZEPTE FÜR DEPONIEEN

Nach RETTENBERGER [2011] sind die Konzepte zur gesetzlich verpflichtenden Nachsorge wie folgt zu definieren:

- Deponierückbau
- Deponieabdichtung mit aktiver oder passiver Entgasung und entsprechender Überwachung der Nachsorgemaßnahmen sowie alternativer Infiltrations- und Sickerwassererfassungsmaßnahmen

- Deponieabdichtung mit aktiver oder passiver Entgasung und vorausgehender Stabilisierung des Deponiekörpers durch Belüftung bei entsprechender Überwachung der Nachsorgemaßnahmen sowie der Sickerwassererfassung

Es ist zu beachten, dass diese Konzepte mit weiteren Maßnahmen kombinierbar sind und deponiespezifische Gegebenheiten möglicherweise zusätzlichen Handlungsbedürfnissen sowie Abwägungsprozessen genügen müssen. Demnach ist die Beurteilung eines bestmöglichen Nachsorgekonzepts spezifisch zu erörtern und zu definieren, wobei grundsätzlich folgende Gesichtspunkte zu den genannten Nachsorgekonzepten zu nennen sind.

2.5.1 DEPONIESTILLEGUNG UND NACHSORGE

Deponien verursachen aufgrund gesetzlicher Rekultivierungs- und Nachsorgepflichten des Betreibers oder Inhabers auch nach Abschluss der Ablagerungsphase weitere Kosten. Diese Kosten für Stilllegungs- und Nachsorgemaßnahmen sind dabei im Normalfall während des Deponiebetriebes als anteilige Deponiegebühr zu erwirtschaften [EITNER, 2010A].

Folgende rechtliche Grundlagen sind im Rahmen des Deponiestilllegungs- und Nachsorgeverfahrens sowie der entsprechenden Kostenkalkulation zu berücksichtigen:

- Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen [KRW-/ABFG, 1994]
- Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts [DEPV, 2009]
- Richtlinie des Rates der Europäischen Gemeinschaft über Abfalldeponien | die Stilllegungs- und Nachsorgekosten (Artikel 10) sowie das Stilllegungs- und Nachsorgeverfahren (Artikel 13) [DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION, 1999]

Für die Berechnung der Höhe der benötigten Rückstellungen sind weitere betriebswirtschaftliche, steuer- und handelsrechtliche Grundlagen hinsichtlich der Berechnungsmethodik zu berücksichtigen, die zu unterschiedlichen Rückstellungshöhen führen [EITNER, 2010A].

2.5.1.1 MAßNAHMEN DER STILLLEGUNGS- UND NACHSORGEPHASE

Die deponiespezifischen Stilllegungs- und Nachsorgekosten ergeben sich aus dem festgelegten Maßnahmenkatalog nach Beendigung der Ablagerungsphase. Dabei sind nach EITNER [2010B] die Phasen wie folgt zu definieren.

1. Stilllegungsphase:

„Zeitraum vom Ende der Ablagerungsphase der Deponie oder eines Deponieabschnittes bis zur endgültigen Stilllegung der Deponie oder eines Deponieabschnittes nach § 36 Absatz 3 des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes.“

Folgende Sicherungsmaßnahmen sind dabei nach Abstimmung mit der zuständigen Behörde vom Deponiebetreiber oder -besitzer zu leisten:

- Aufbringen einer temporären Oberflächenabdeckung
- Bereitstellung der Sickerwassererfassung und -behandlung
- Gewährleistung der Grundwasserüberwachung
- Aufbau eines Oberflächenwassermanagements
- Erneuerung von erforderlichen technischen Einrichtungen
- Bereitstellung der Deponiegasfassung und -behandlung
- Errichtung der Oberflächenabdichtung und Rekultivierung
- Ggf. Rückbau entbehrlcher Anlagen
- Sicherstellung der Reparatur, Wartung, Unterhaltung und Kontrolle von Anlagen und Einrichtungen
- Bereitstellung von Mess- und Kontrollprogrammen (Meteorologische Daten, Emissionsdaten, Grund- und Oberflächenwasserdaten, Daten zum Deponiekörper wie bspw. Setzungsmessungen)
- Ganzheitliche Dokumentation.

Nach Erfüllung der behördlich geforderten Stilllegungsmaßnahmen hat der Betreiber oder Besitzer einer Deponie die Feststellung des Abschlusses der Stilllegung nach § 36 Abs. 3 des KrW-/AbfG zu beantragen. Die zuständige Behörde hat abschließend die endgültige Stilllegung festzulegen.

2. Nachsorgephase:

„Zeitraum nach der endgültigen Stilllegung einer Deponie oder eines Deponieabschnittes bis zu dem Zeitpunkt, zu dem die Behörde nach § 36 Abs. 5 des KrW-/AbfG den Abschluss der Nachsorge der Deponie feststellt.“

In diesem Zusammenhang hat der Deponiebetreiber oder -besitzer alle Maßnahmen, insbesondere die genannten Kontroll- und Überwachungsmaßnahmen, zu leisten, die zur Verhinderung der Beeinträchtigung des Wohles der Allgemeinheit beitragen.

Dabei nennt § 12 der DEPv [2009] folgenden Maßnahmenkatalog zur Kontrolle, Verminderung und Vermeidung von Emissionen, Immissionen, Belästigungen sowie Gefährdungen:

- Sickerwassererfassung und -behandlung
- Grundwasserüberwachung
- Oberflächenwassermanagement
- Erneuerungsmaßnahmen von erforderlichen technischen Einrichtungen
- Restentgasungsmaßnahmen
- Rückbau entbehrlcher Anlagen
- Reparatur, Wartung, Unterhaltung, Kontrolle von Anlagen und Einrichtungen
- Mess- und Kontrollprogramme (Meteorologische Daten, Emissionsdaten, Grundwasser-/Oberflächenwasserdaten, Daten zum Deponiekörper wie Setzungsmessungen, Gasmessungen etc.)
- Dokumentation.

Der endgültige Abschluss der Nachsorgephase wird durch § 11, Abs. 2 der DEPv [2009] geregelt. Hierin heißt es,

„ ...Kommt die zuständige Behörde unter Berücksichtigung

1. der Prüfkriterien nach Anhang 5 Nummer 10 zu dem Schluss, dass aus dem Verhalten einer Deponie der Klasse 0, I, II oder III oder
2. der Dokumentation über den Zustand der Verwahrung der Tageszugänge nach Anhang 2 Nummer 4 zu dem Schluss, dass aus dem Verhalten einer Deponie der Klasse IV

zukünftig keine Beeinträchtigungen des Wohles der Allgemeinheit zu erwarten sind, kann sie auf Antrag des Deponiebetreibers die Kontroll- und Überwachungsmaßnahmen nach § 12 aufheben und nach § 36 Absatz 5 des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes den Abschluss der Nachsorgephase feststellen.“

Letztlich entscheidet somit die zuständige Behörde, zu welchem Zeitpunkt die Nachsorgephase einer Deponie beendet werden kann.

2.5.1.2 ZEITDAUER DER NACHSORGE

Nach Deponieverordnung ist für Deponien der Klasse II bis IV ein Nachsorgezeitraum von mindestens 30 Jahren rechnerisch zu erfassen. Die reale Dauer der Nachsorgephase lässt sich jedoch nur durch Emissionsprognosen computergestützter Modelle abschätzen. Hierbei zeigt sich, dass der definierte Zeitraum von 30 Jahren in den meisten Fällen deutlich überschritten wird. Den limitierenden Faktor stellt dabei die geforderte Sickerwasserqualität dar [WOLFGARTEN, 2010].

Im Fall des Deponiegases kann aufgrund vorliegender Studien davon ausgegangen werden, dass bei kommunalen Hausmülldeponien die aktive Entgasungsphase des Deponiekörpers nach etwa 30 Jahren eingestellt werden kann. Aus wirtschaftlicher Sicht ist hierbei interessant, wie lange das erfasste Deponiegas in Blockheizkraftwerken oder vergleichbaren Einrichtungen lukrativ genutzt werden kann und wie lange die abschließende Phase der Deponiegasfassung mittels Gasbehandlung in einer Gasfackelanlage durchzuführen ist.

Hinsichtlich zulässiger Deponiegasrestemissionen werden in der Literatur Werte von 0,02 bis 0,14 m³*m⁻²*d⁻¹ genannt [EITNER, 2010c].

TABELLE 11: ABSCHÄTZUNG DES ZEITRAUMS BIS ZUM ERREICHEN DER JEWEILIGEN GRENZKONZENTRATION GEMÄß ANFORDERUNGSWERTEN ANHANG 51 ABwV [EITNER, 2010c]

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

Demnach kann davon ausgegangen werden, dass im Bereich der Sickerwassererfassung und -behandlung Nachsorgezeiträume von mehreren Jahrzehnten bis Jahrhunderten zu berücksichtigen sind. Entsprechend sind auch die Einrichtungen zur Sickerwassererfassung, Oberflächenwasserableitung, Deponieüberwachung usw. langfristig erforderlich und kostenmäßig zu erfassen, wobei ein zeitlich gestaffelter Maßnahmenumfang zu berücksichtigen ist.

2.5.1.3 NACHSORGE UND FOLGEKOSTEN

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

Demnach sind alle folgenden Maßnahmen wie bspw. das Aufbringen einer Oberflächenabdichtung, die Rekultivierung und der Rückbau von Betriebseinrichtungen in der Folgekostenberechnung zu berücksichtigen. Der häufig verwendete Begriff Nachsorgekosten ist daher besser durch den Begriff Folgekosten zu ersetzen. Einen Überblick über die darin enthaltenen Kostenstrukturen gibt Abbildung 20. Dabei sind alle Punkte dunkel hervorgehoben, die im Rahmen der betriebswirtschaftlichen Folgekostenberechnung zu berücksichtigen sind [BURKHARDT & EGLOFFSTEIN, 2005].

Nachsorgekosten:

Kosten, die innerhalb des Nachsorgezeitraums einer Deponie anfallen.

Folgekosten:

Kosten der Stilllegungsphase und des Nachsorgezeitraums einer Deponie.

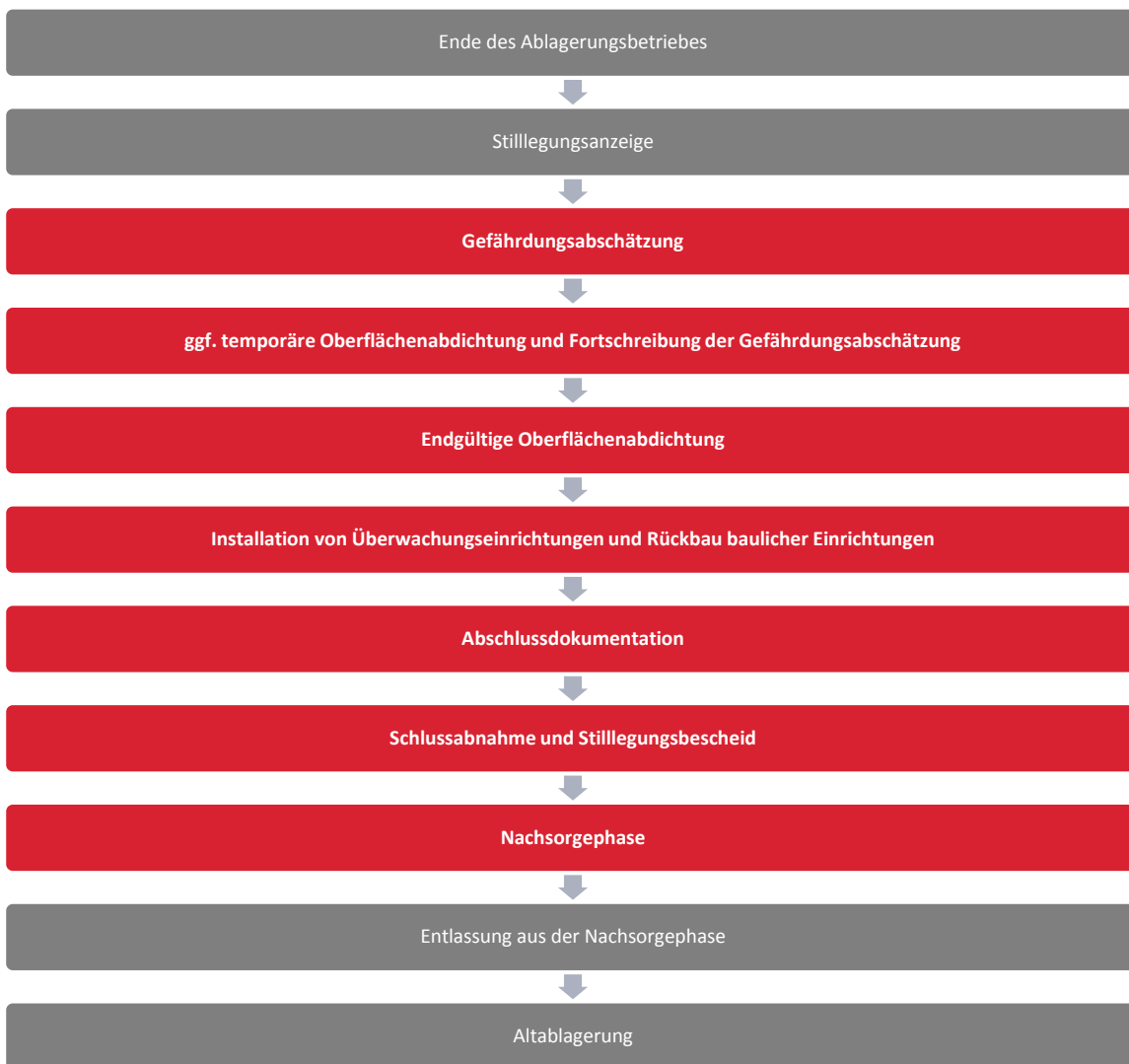


ABBILDUNG 20: VERLAUF DER STILLEGUNG EINER DEPONIE AUS ABFALLRECHTLICHER SICHT [BURKHARDT & EGLOFFSTEIN, 2005]

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

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

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

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

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

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

In diesem Zusammenhang sind in der Fachliteratur sehr unterschiedliche durchschnittliche Folgekosten vorhanden. Für Berechnungen, die auf Grundlage der TA-Siedlungsabfall beruhen und Nachsorgezeiträume von 30 bis 80 Jahren berücksichtigen, können die in Tabelle 12 angegebenen spezifischen Kosten angenommen werden. Die Kosten der Oberflächenabdichtung und Rekultivierung werden hierbei berücksichtigt.

Es wird deutlich, dass die Höhe der Folgekosten im Wesentlichen von der Deponiefläche und dem Ablagerungsvolumen abhängt [BURKHARDT & EGLOFFSTEIN, 1996].

TABELLE 12: SPEZIFISCHE FOLGEKOSTEN FÜR HAUSMÜLLDEPONIEEN IN ABHÄNGIGKEIT DES ABLAGERUNGSVOLUMENS UND DER ABLAGERUNGSFLÄCHE [BURKHARDT & EGLOFFSTEIN, 2005]

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

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

EITNER [2010c] kommt im Rahmen von betriebswirtschaftlichen Rückstellungsberechnungen verschiedener Deponien auf die in Tabelle 13 aufgezeigten Größenordnungen.

TABELLE 13: RÜCKSTELLUNGSKOSTEN FÜR UNTERSCHIEDLICHE SIEDLUNGSABFALLDEPONIEEN

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

STEGMANN ET AL. [2006] stellen im Rahmen einer Studie die in Tabelle 14 enthaltene praxisnahe Folgekostenkalkulation auf. Hierbei können die Kosten in Abhängigkeit der Nachsorgedauer, der Deponiegröße, der vorhandenen technischen Einrichtungen und/oder der regionalen Situation abweichen. Einen abschließenden Überblick zur Verteilung der anfallenden Kosten gibt Tabelle 15.

TABELLE 14: PRAXISNAHE FOLGEKOSTENKALKULATION [STEGMANN ET AL., 2006]

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

TABELLE 15: MITTLERE VERTEILUNG DES KOSTENAUFWANDS FÜR STILLLEGUNG UND NACHSORGE [BARTL, 2005]

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

2.6 ROHSTOFFMÄRKTE UND PREISENTWICKLUNG

Seit Beginn des 21. Jahrhunderts steigt die weltweite Nachfrage nach Industriemetallen, Seltenen Erden und Energie enorm. Dieser Aspekt zeigt sich unter anderem in den stark volatilen Märkten und damit verbundenen Preisschwankungen [MATTHIES, 2011].

In diesem Kontext steigt laut Schätzungen der UN die Weltbevölkerung derzeit sekundlich um 2,6 Menschen [UN, 2011]. Dies bedeutet, dass im Jahr 2050 ca. 9 Mrd. Menschen von der Erde und ihren Ressourcen leben müssen. Einen wesentlichen Beitrag zu dieser Entwicklung werden nach Expertenmeinung insbesondere die Schwellen- und Entwicklungsländer leisten [OECD, 2011; ALLIANZ GLOBAL INVESTORS, 2011].

Gleichzeitig wird prognostiziert, dass sich die Weltwirtschaft, gemessen am GDP, verdoppelt. Dabei wird besonders in den BRIC-Staaten mit einem starken Wirtschafts- und entsprechendem Konsumwachstum gerechnet [OECD, 2011].

Im Zusammenhang steigender Weltbevölkerung, wachsender Wirtschaftsleistung und sich erhöhendem Konsum werden auch der Rohstoff- und Energieverbrauch stetig steigen [FISCHER-KOWALSKI, 2009]. Hochrechnungen des WORLD ENERGY COUNCILS [2007] rechnen bis 2025 mit einer Verdopplung des weltweiten Stromverbrauchs, der sich bis zum Jahr 2050 sogar verdreifacht.

Noch drastischer wird der Anstieg des Primärenergieverbrauchs der nicht-OECD-Staaten angesehen. Dieser wird sich bis 2035 um ca. 90 % steigern. 2035 wird alleine China etwa 70 % mehr Energie verbrauchen als die USA, die zu diesem Zeitpunkt (2035) als zweitgrößter Konsument angesehen wird [IEA, 2011].

Dieser starke Wachstumstrend lässt sich teilweise noch deutlicher bei Industriemetallen wie Kupfer, Aluminium und Eisen erkennen [OECD, 2011; BANK, 2011; ERICSSON, 2011]. Entwicklungsländer haben aktuell im Vergleich zu Industrieländern einen um Dreiviertel geringeren Metallverbrauch, obwohl dort etwa fünfmal mehr Menschen leben. Tabelle 16 veranschaulicht dies deutlich.

TABELLE 16: DURCHSCHNITTLICHER ROHSTOFFVERBRAUCH PRO EINWOHNER UND JAHR [ALLIANZ GLOBAL INVESTORS, 2011]

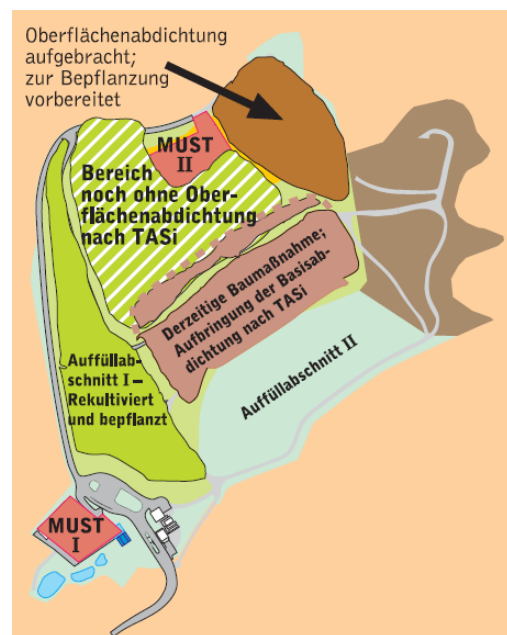
Rohstoff [kg*EW ⁻¹ *a ⁻¹]	Deutschland	China	Potenzieller Wachstumsfaktor Chinas
Aluminium [kg*EW ⁻¹ *a ⁻¹]	16	2	8,0
Erdöl* [kg*EW ⁻¹ *a ⁻¹]	1.645	411	4,0
Stahl [kg*EW ⁻¹ *a ⁻¹]	465	271	1,7
Kupfer[kg*EW ⁻¹ *a ⁻¹]	16	3	5,3

* 1 Barrel Erdöl entspricht einem Volumen von 159 l. Bei einer Dicht von 0,862 Mg*m⁻³ sind dies 137 kg*Barrel⁻¹.

Expertenmeinungen gehen davon aus, dass vor diesem Hintergrund die zukünftige Verfügbarkeit einzelner Industriemetalle wie bspw. Kupfer stark gefährdet ist und neue Lösungen gefunden werden müssen [ERICSSON, 2011]. Neben Substitutions- und Explorationsmaßnahmen stellen in diesem Kontext anthropogene Depots (Deponien, Altgebäude, E-Schrott etc.) eine Quelle dar, in denen sich ca. 80 bis 90 % der bisher gewonnenen Rohstoffe befinden [WUPPERTAL INSTITUT, 2008]. Ähnliches gilt für energetische Rohstoffe, die in Form von Kunststoffabfällen, Holzresten etc. allgegenwärtig vorliegen. Insgesamt wird daher auch in Zukunft ein weiterer Preisanstieg auf den nationalen und internationalen Rohstoffmärkten zu verzeichnen sein, der sich unmittelbar auf mehr oder minder gekoppelte Sekundärrohstoffmärkte auswirkt.

3 DIE KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

Die Kreismülldeponie Hechingen wurde im August 1982 in Betrieb genommen. Bis zum gesetzlich festgelegten Stichtag (31.05.2005) wurden alle aus damaliger Sicht nicht verwertbaren Abfälle aus Haushalten, Gewerbebetrieben und dem Baugewerbe auf der Kreismülldeponie unvorbehandelt abgelagert. Das Gesamtvolumen des im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Deponieabschnitts I beträgt dabei nach Angaben des Betreibers 2,3 Mio. m³, die auf einer Fläche von 12 ha lagern. Hiervon wurden in den vergangenen Jahren ca. 8 ha vollständig rekultiviert. Bei weiteren 3 ha ist die Oberflächenabdeckung aufgebracht. Die maximale Einbauhöhe kann mit ca. 40 m beziffert werden [ZOLLERNALBKREIS, 2010]



ERSTER FÜLLABSCHNITT

Beginn der Verfüllung:	August 1982
Ende der Verfüllung:	Frühjahr 2004
Einbauvolumen:	2,3 Mio. cbm; davon Abfall: 1,7 Mio. m ³
Fläche:	14,6 ha (einschl. Betriebsflächen)
Aufbau der Deponie:	Der Aufbau der Deponieabdichtung erfolgte nach dem damaligen Standard gemäß des Deponiemerkblattes vom 01.09.1979
Maximale Einbauhöhe:	Anfangshöhe bei Betriebsgebäude: 550 m üNN Endhöhe nach Befüllung: 622 m üNN

ABBILDUNG 21: ÜBERSICHTSPLAN DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN UND DEREN KENNDATEN



ABBILDUNG 22: LUFTAUFNAHME DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN AUS DEM JAHR 2009

3.1 ENTWICKLUNG DER ABFALLWIRTSCHAFT IM ZOLLERNALBKREIS

Der Umgang mit Abfällen hat sich in Deutschland und somit auch im Zollernalbkreis in den letzten 30 Jahren stark geändert. Bis Anfang der 70er-Jahre gehörten Begriffe wie Abfallvermeidung, Abfalltrennung und Abfallverwertung noch nicht zum allgemeinen Vokabular der Abfallwirtschaft. Vielmehr stand die Beseitigung der Abfälle in Form der Deponierung im Vordergrund. Einen Eindruck hiervon vermittelt Abbildung 23. Wie die Abbildung zeigt, wurden selbst Autowracks auf solchen gemeindeeigenen „Schuttplätzen“ deponiert. Erst durch die Zentralisierung der Abfallentsorgung im Jahre 1972 wurde ein Schritt in Richtung der geordneten Ablagerung getan.

Zudem wurde Mitte der 70er Jahre versucht, durch aufwendige Verfahrenstechnik aus gemischt gesammeltem Abfall verwertbare Stoffe auszusortieren. Als typisches Projekt dieser Zeit ist das „Bundesmodell Abfallverwertung Reutlingen-Tübingen“ zu nennen. Aufgrund veränderter Abfallzusammensetzung und hoher Kosten wurde diese Konzeption jedoch nicht weiter verfolgt (BIDLINGMAIER & KRANERT, 2004).

So wurden im Zollernalbkreis nach und nach alle „gemeindeeigenen Schuttplätze“ geschlossen und 1982 die zentrale Kreismülldeponie Hechingen eröffnet. Ein ökologisch und nachhaltig orientiertes Management der Abfallsammlung sowie –entsorgung unterschiedlicher Abfallströme war jedoch keinesfalls gegeben (Abbildung 24).



ABBILDUNG 23: GEMEINDEEIGENER SCHUTTPLATZ UND ABLAGERUNGSPRAXIS | HECHINGEN [ZOLLERNALBKREIS, 2010]



ABBILDUNG 24: AUFNAHMEN DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN AUS DEM JAHR 1999 [ZOLLERNALBKREIS, 2010]

Vielmehr nahmen die Abfallmengen in den folgenden Jahren stetig zu, sodass geschaffener Deponieraum immer knapper wurde. Aus dieser Not heraus entstand 1985 die erste „Müllkonzeption des Zollernalbkreises“, die erste Ansätze zum heutigen Verständnis von Abfallwirtschaft markierte. Dabei wurde das Abfallwirtschaftskonzept des Zollernalbkreises in den folgenden Jahren ständig weiterentwickelt und den veränderten internationalen sowie nationalen Rahmenbedingungen angepasst. Einen Überblick hierzu gibt Tabelle 17.

TABELLE 17: KENNDATEN DER ABFALLWIRTSCHAFTLICHEN ENTWICKLUNG IM ZOLLERNALBKREIS [ZOLLERNALBKREIS, 2010]

Jahr	Abfallwirtschaftliche Änderungen
1983	mobile Schadstoffsammlung
1984	Zuschuss für Vereinssammlungen
1985	erste Müllkonzeption
1987	Pilotversuch zur Biotonne
1988	erste separate Sammlung von Kühlgeräten
1989	Kreisweite Schrottsammlung
1989	Einrichtung der ersten beiden Wertstoffzentren
1990	Kreisweite Grünabfallsammlung
1991	flächendeckend Depotcontainer für Glas und Papier
1991	weitere acht Wertstoffzentren
1992	Kreisweite Einführung der Biotonne
1992	Gelber Sack
1995	separate Altholzsammlung
1996	separate Erfassung von Elektrogeräten
1996	monatliche Sammlung von Fernsehern und Monitoren
1998	neues Abfuhrsystem bei der öffentlichen Müllabfuhr
2001	Einführung der Verwiegung
2003	Kreisweite Einführung der Papiertonne
seit 01.06.2005	thermische Verwertung und Beseitigung der Restabfälle

Untersuchungen zur spezifischen Zusammensetzung des Abfalls des Zollernalbkreises sind lediglich für die Abfallfraktion Hausmüll für die Jahre 1987 bis 1989 vorhanden (Abbildung 25). Generell kann hierbei festgehalten werden, dass sich diese am damaligen bundesdeutschen Durchschnitt orientieren und keine Besonderheiten zu verzeichnen sind. Die Tatsache, dass im Jahr 1989 die Restfraktion einen sehr hohen Stellenwert einnimmt und im Jahr 1987 deutlich höhere Organik-Gehalte vorliegen, ist der Methodik der Untersuchungen geschuldet.

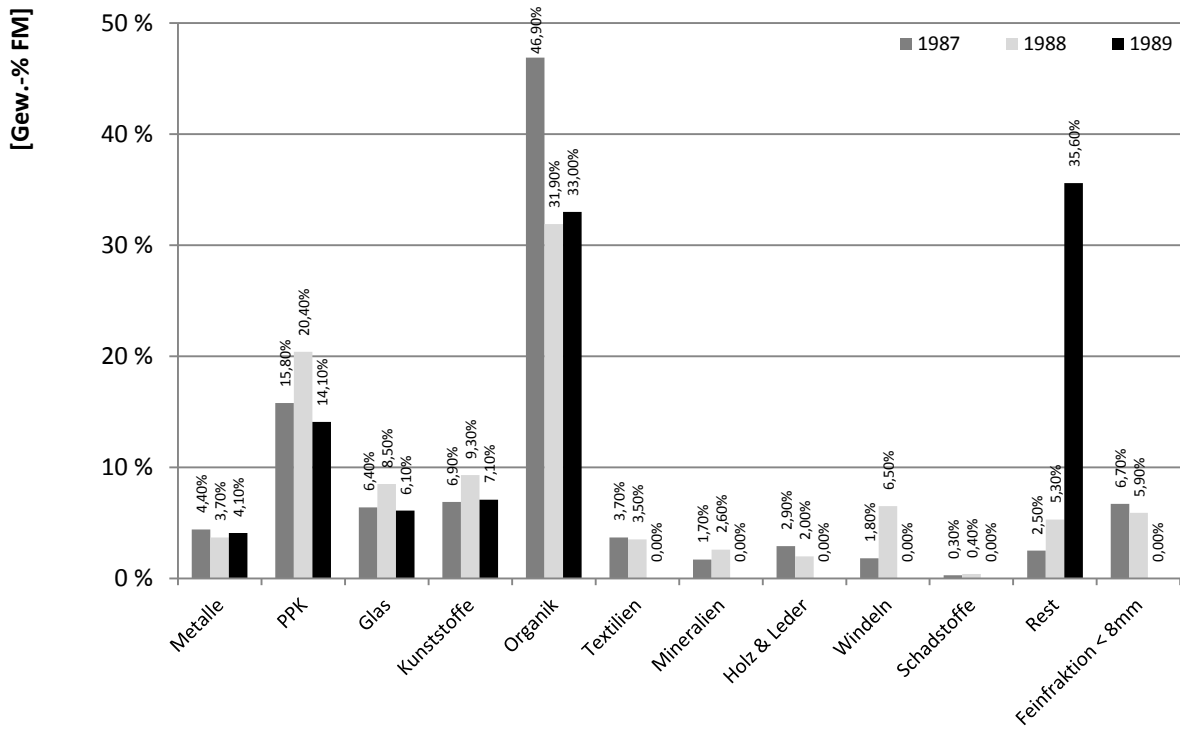


ABBILDUNG 25: MITTLERES SORTIERERGEBNIS DER HAUSMÜLLSORTIERUNGEN IM ZOLLERNALBKREIS AUS DEN JAHREN 1987 BIS 1989

4 ANSATZ UND KONZEPTION DER UNTERSUCHUNGEN

4.1 ERMITTLUNG DER ABLAGERUNGSMENGE

Aufgrund fehlender gesetzlicher Dokumentationspflichten aus frühen Jahren der Abfallbeseitigung gestaltet sich die Rekonstruktion abgelagerter Abfallmengen nach entsprechenden Abfallarten schwierig. Hierbei treten folgende Probleme auf:

- (A) Eine noch heute nachvollziehbare Dokumentation der Abfallablagerung hat nicht stattgefunden.
- (B) Spezifische Abfall- bzw. Ablagerungsmengen wurden subjektiv geschätzt und/oder volumenbezogen erfasst.
- (C) Aufgrund fehlender einheitlicher Regelung zur Charakterisierung von Abfällen bzw. zur Einteilung von Abfällen nach Abfallarten aus heutiger Sicht, treten subjektiv bedingte Fehlabschätzungen auf.
- (D) Faktoren zur Vereinheitlichung von volumen- oder massenbezogenen Ablagerungsmengen existieren nicht bzw. variieren in Abhängigkeit des Einzugsgebiets.

Nachfolgend werden die auf der Kreismülldeponie Hechingen vorgefundenen Problemstellungen sowie die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Lösungsansätze aufgezeigt.

Zu (A): Die Dokumentation der Abfallablagerung auf der Kreismülldeponie Hechingen zeigt in keinem Ablagerungsjahr fehlende Ablagerungsmengen auf. Dennoch bestehen zwischen den einzelnen Quellen Unterschiede, deren Variation durch Verschneidung der Daten im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigt wird.

Zu (B): Bis zur Einführung einer Wiegeeinrichtung im Jahr 1988 wurden die angelieferten Abfallmengen ausschließlich durch subjektive Schätzung erfasst und entsprechend dokumentiert. Entsprechend sind in diesem Zeitraum höhere Fehlabschätzungen zu vermuten. Zusätzlich ist anzumerken, dass durch die stetige Erweiterung des Wiegesystems detailliertere Daten gesammelt werden konnten.

Zu (C): Wie zuvor bereits genannt, konnten mit zunehmender Erweiterung der Wiegeeinrichtung sowie aufgrund gesetzlicher Änderungen stetig detailliertere Daten der Abfallmenge sowie deren Einteilung erfasst werden. Für den Zeitraum bis ca. 1988 existieren in den Aufzeichnungen der Kreismülldeponie Hechingen lediglich folgende sieben Abfallarten:

- Hausmüll
- Gewerbeabfall
- Sperrmüll
- Sande
- Bauschutt
- Erdaushub/Rekultivierungsmaterial
- Schlämme.

Das aktuelle und ausgewertete digitale Betriebstagebuch bzw. Wiegeprotokoll umfasst hingegen ca. 150 unterschiedliche Abfallarten, die aufgrund des methodischen Vorgehens den zuvor genannten Hauptabfallarten zugeordnet wurden. Bedeutende und lückenlos dokumentierte Unterpositionen wie bspw. große Mengen an Textilabfällen werden im Rahmen der Ablagerungsmengenermittlung separat betrachtet.

Zu (D): Dokumentierte Angaben zur Dichte der Abfälle im Zollernalbkreis konnten im Rahmen der Rechercharbeit nicht ermittelt werden. Aus diesem Grund werden zur Umrechnung der volumenbezogenen Angaben aus den Jahren 1982 – 1988 allgemein gültige Literaturwerte herangezogen (Tabelle 18).

TABELLE 18: DICHTEN VON ABFÄLLEN IN ABHÄNGIGKEIT DER ABFALLART

Abfallart	MIN [Mg*m ⁻³]	Mittelwert [Mg*m ⁻³]	MAX [Mg*m ⁻³]
Hausmüll	0,25	0,28	0,33
Gewerbeabfälle	0,50	0,80	-
Sperrmüll	0,11	0,35	0,15
Schlämme	-	0,80	-
Bauschutt	0,06	0,24	0,48

Zur Abbildung der oben beschriebenen Problematik in Form von Mengenvariationen konnten insgesamt die in Tabelle 19 beschriebenen Szenarien aus dem bereitgestellten Datenmaterial abgeleitet werden. Eine Mengenaufstellung ist Anhang 4 bis 10 zu entnehmen.

TABELLE 19: SZENARIOBETRACHTUNG ZUR BESTIMMUNG DER ABLAGERUNGSMENGE AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

Merkmal	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5
Ersteller	Universität Gießen	Universität Gießen	Landratsamt Zollernalbkreis	Landratsamt Zollernalbkreis	Landratsamt Zollernalbkreis
Erfasster Zeitraum	1982 - 1987	1989 - 2005	1982 - 2005	1989 - 2005	1982 – 1987
Zeitliche Differenzierung	Jährliche Ablagerungsmenge	Jährliche Ablagerungsmenge	Jährliche Ablagerungsmenge	Jährliche Ablagerungsmenge	Jährliche Ablagerungsmenge
Erfasste Abfallarten	Hausmüll Gewerbeabfall Sperrmüll Sande Bauschutt Schlämme	Hausmüll Gewerbeabfall Sperrmüll Sande Bauschutt Erdaushub Schlämme	Hausmüll Gewerbeabfall Sperrmüll Sande Schlämme	Hausmüll Gewerbeabfall Sperrmüll Sande Bauschutt Erdaushub Schlämme	Hausmüll Gewerbeabfall Sperrmüll Bauschutt
Beschreibung	Auswertung und Zusammenstellung der vorliegenden handschriftlichen Betriebstagebücher	Auswertung und Zusammenstellung der digitalen Mengenerfassung	Bereitgestellte Zusammenfassung der handschriftlichen und digitalen Mengenerfassung	Auswertung und Zusammenstellung der digitalen Mengenerfassung durch Herrn Kittel	Erfasstes Datenmaterial im Rahmen der Versuchs- kompostierung

4.1.1 JAHRESSPEZIFISCHE VARIATION

Auf Basis der dargestellten Szenarien ist es möglich, jahresspezifische Ablagerungsmengen sowie deren dokumentationsbedingten Variationen abzuleiten. Als statistische Maßzahlen dienen hierbei der jährliche Mittelwert der Ablagerungsmenge sowie dessen Standardabweichung.

Die zudem berechneten Variationskoeffizienten der einzelnen Abfallarten und der Gesamtablagerungsmenge geben Aufschluss über die Güte der Ausgangsdaten.

FORMEL 4: BERECHNUNG DES JAHRESSPEZIFISCHEN MITTELWERTS DER ABFALLABLAGERUNG NACH ABFALLARTEN

$$\bar{x}_{jAbfart} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{iAbfart}$$

Mit:

$\bar{x}_{jAbfart}$ = Mittlere jährliche Ablagerungsmenge der Abfallarten [Mg FM * a⁻¹]

n = Anzahl der betrachteten Szenarien [Anzahl]

$x_{iAbfart}$ = Jährliche Ablagerungsmenge der Szenarien nach Abfallarten [Mg FM * a⁻¹]

FORMEL 5: BERECHNUNG DER JAHRESSPEZIFISCHEN STANDARDABWEICHUNG NACH ABFALLARTEN

$$s_{jAbfart} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{iAbfart} - \bar{x}_{jAbfart})^2}$$

Mit:

$s_{jAbfart}$ = Jahresspezifische Standardabweichung der Ablagerungsmenge nach Abfallarten [Mg FM * a⁻¹]

n = Anzahl der betrachteten Szenarien [Anzahl]

$x_{iAbfart}$ = Jährliche Ablagerungsmenge der Szenarien nach Abfallarten [Mg FM * a⁻¹]

$\bar{x}_{jAbfart}$ = Mittlere jährliche Ablagerungsmenge der Abfallarten [Mg FM * a⁻¹]

FORMEL 6: BERECHNUNG DES JAHRESSPEZIFISCHEN VARIATIONSKOEFFIZIENTEN NACH ABFALLARTEN

$$V_{jAbfart} = \frac{s_{jAbfart}}{\bar{x}_{jAbfart}} * 100$$

Mit:

$V_{jAbfart}$ = Jahresspezifischer Variationskoeffizient der Ablagerungsmenge nach Abfallarten [%]

$s_{jAbfart}$ = Jahresspezifische Standardabweichung der Ablagerungsmenge nach Abfallarten [Mg FM * a⁻¹]

$\bar{x}_{jAbfart}$ = Mittlere jährliche Ablagerungsmenge der Abfallarten [Mg FM * a⁻¹]

Entsprechend Formel 4 bis Formel 6 wird zudem die mittlere jährliche Gesamtablagerungsmenge und deren Variation näher betrachtet.

4.1.2 GESAMTABLAGERUNGSMENGE

Die Aufsummierung der jahresspezifisch ermittelten Ablagerungsmengen und Variationen nach Abfallarten ermöglicht die Abbildung der modellierten Gesamtablagerungsmenge. Zusätzlich werden die prozentualen Anteile der einzelnen Abfallarten an der Gesamtablagerungsmenge verdeutlicht.

FORMEL 7: BERECHNUNG DER MITTLEREN GESAMTABLAGERUNGSMENGE NACH ABFALLARTEN

$$\bar{x}_{Abfart} = \sum_{i=1}^j \bar{x}_{jAbfart}$$

Mit:

\bar{x}_{Abfart} = Mittlere Gesamtablagerungsmenge der Abfallarten [Mg FM]

j = Anzahl der betrachteten Ablagerungsjahre [Anzahl]

$\bar{x}_{jAbfart}$ = Mittlere jährliche Ablagerungsmenge der Abfallarten [Mg FM * a⁻¹]

FORMEL 8: BERECHNUNG DER STANDARDABWEICHUNG DER GESAMTABLAGERUNGSMENGE NACH ABFALLARTEN

$$S_{Abfart} = \sum_{i=1}^j S_{jAbfart}$$

Mit:

S_{Abfart} = Standardabweichung der Gesamtablagerungsmenge der Abfallarten [Mg FM]

j = Anzahl der betrachteten Ablagerungsjahre [Anzahl]

$S_{jAbfart}$ = Jährliche Standardabweichung der Abfallarten [Mg FM * a⁻¹]

FORMEL 9: BERECHNUNG DES VARIATIONSKOEFFIZIENTEN NACH ABFALLARTEN

$$V_{Abfart} = \frac{S_{jAbfart}}{\bar{x}_{jAbfart}} * 100$$

Mit:

V_{Abfart} = Variationskoeffizient der Ablagerungsmenge nach Abfallarten [%]

$S_{jAbfart}$ = Jahresspezifische Standardabweichung der Ablagerungsmenge nach Abfallarten [Mg FM * a⁻¹]

$\bar{x}_{jAbfart}$ = Mittlere jährliche Ablagerungsmenge der Abfallarten [Mg FM * a⁻¹]

FORMEL 10: BERECHNUNG DES VARIATIONSKOEFFIZIENTEN DER ABFALLARTEN IN BEZUG ZUR GESAMTABLAGERUNGSMENGE

$$V_{Abfart_g} = \frac{S_{Abfart}}{\sum \bar{x}_{Abfart}} * 100$$

Mit:

V_{Abfart_g} = Variationskoeffizienten der Abfallarten in Bezug zur Gesamtablagerungsmenge [%]

S_{Abfart} = Standardabweichung der Gesamtablagerungsmenge der Abfallarten [Mg FM]

\bar{x}_{Abfart} = Mittlere Gesamtablagerungsmenge der Abfallarten [Mg FM]

4.1.3 VOLUMENERMITTLUNG

Die jährlich durch das MAUTHE INGENIEUR- UND ARCHITEKTURBÜRO [2011] durchgeführte Volumenermittlung des Fortschritts der Verfüllung des Deponiekörpers der Kreismülldeponie Hechingen stellt die Datengrundlage der volumenbezogenen Ablagerungsermittlung dar.

Zur Abgrenzung unterschiedlicher Ablagerungsepochen wird in diesem Kontext auf das tagesspezifische Ablagerungsvolumen zurückgegriffen. Dieses berechnet sich wie folgt:

FORMEL 11: BERECHNUNG DES TAGESPEZIFISCHEN ABLAGERUNGSVOLUMENS

$$Av_{spez} = \frac{Av}{n}$$

Mit:

Av_{spez} = Tägliches Ablagerungsvolumen [$m^3 \cdot d^{-1}$]

Av = Ablagerungsvolumen des jeweils betrachteten Zeitraums [m^3]

n = Anzahl der betrachteten Ablagerungstage [d]

4.1.4 DIGITALE HÖHENMODELLE

Neben der Rekonstruktion der Abfallablagerung über die Massenaufzeichnungen in Form des Betriebstagebuchs bieten historische sowie aktuelle Vermessungspläne des Deponiekörpers die Möglichkeit zur Erstellung eines 3D-Strukturmodells, das zur spezifischen Ermittlung des Ablagerungsvolumens herangezogen werden kann. Zudem ist es hierdurch möglich, das Alter einzelner Ablagerungsbereiche bzw. Abschnitte und somit deren spezifisches Ressourcenpotenzial zu bestimmen.

Mittels Geographischem Informationssystem (ArcGis 9) wurden insgesamt 10 historische Vermessungspläne digitalisiert und georeferenziert. Die hierbei erfassten Zeitaufnahmen liegen in den Jahren:

- | | |
|--------|--------|
| - 1982 | - 1985 |
| - 1987 | - 1988 |
| - 1989 | - 1990 |
| - 1991 | - 1995 |
| - 2003 | - 2011 |

Durch Konvertierung der digitalisierten Primärdaten in TIN-Datensätze ist es zudem möglich, ein zeitspezifisches 3D-Strukturmodell der Kreismülldeponie Hechingen abzubilden. Des Weiteren können hierüber Querschnitte durch den Deponiekörper gelegt werden.

Zur Ermittlung der Mächtigkeit lokaler Ablagerungsschichten können aufgrund der vorliegenden Datenlage ausschließlich die in Tabelle 20 charakterisierten Zeiträume betrachtet werden. Hieraus werden einerseits die Schichtabfolge sowie andererseits deren jeweilige Mächtigkeit deutlich. Das entsprechende Potenzial einzelner Lagen und Deponiebereiche kann somit lokalisiert werden.

TABELLE 20: SPEZIFISCHE ABLAGERUNGSMÄCHTIGKEITEN DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

Zeitraum [Jahr]		Erfasste Ablagerungsdauer [Jahre]
von	bis	
1982	1985	3
1985	1987	2
1987	1988	1
1988	1989	1
1989	1990	1
1990	1991	1
1991	1995	4
1995	2011	6

Die in diesem Zusammenhang verarbeitete Geodatengrundlage basiert auf Rasterdaten, die mittels entsprechendem Interpolationsverfahren (Nearest-Neighbor; Rasterweite: 1x1 m) aus den vorhandenen TIN-Datensätzen generiert wurden. Durch Verschneidung der zeitspezifischen

Ablagerungszustände mittels „Raster-Divisionsmethode“ können so Geoinformationsdaten und -karten zur zeitabhängigen Änderung der lokalen Ablagerungsmächtigkeit erzeugt werden. In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, dass Setzungserscheinungen des jeweils betrachteten Zeitabschnitts nicht berücksichtigt werden konnten. Hieraus resultieren einerseits negative Höhenunterschiede sowie andererseits Unterschätzungen der realen Ablagerungsmächtigkeit.

Die Darstellung von Querschnitten durch den Deponiekörper beschränkt sich im Rahmen der Ressourcenpotenzialermittlung auf die Ablagerungsabfolge der untersuchten Bohrbereiche. Hieraus wird es möglich, den einzelnen Bohrabschnitten altersbezogene Angaben zur Abfallablagerung zuzuordnen und zeitspezifische Unterschiede der Abfall- bzw. Deponiegutzusammensetzung abzuleiten.

4.2 RESSOURCENPOTENZIALERMITTLUNG

Die Ressourcenpotenzialermittlung der Kreismülledeponie Hechingen beruht auf einem theoretischen und einem realen Ansatz. Dabei spielt für beide Modelle die zuvor beschriebene Bestimmung der spezifischen Ablagerungsmenge eine entscheidende Rolle. Der Unterschied beider Ansätze liegt in der verarbeiteten Datengrundlage. Das theoretische Ressourcenpotenzial beruht dabei im Wesentlichen auf vorhandenen, zeitspezifischen Primär- und Sekundärstatistiken, die die abfallwirtschaftliche Situation des Einzugsgebiets charakterisieren, wo hingegen die reale Ressourcenpotenzialabschätzung die direkte Datenerhebung wie zum Beispiel Sortieranalysen des Deponieguts vorsieht. Abbildung 26 verdeutlicht schematisch die gegenläufigen Schritte beider Abschätzungsmodelle.

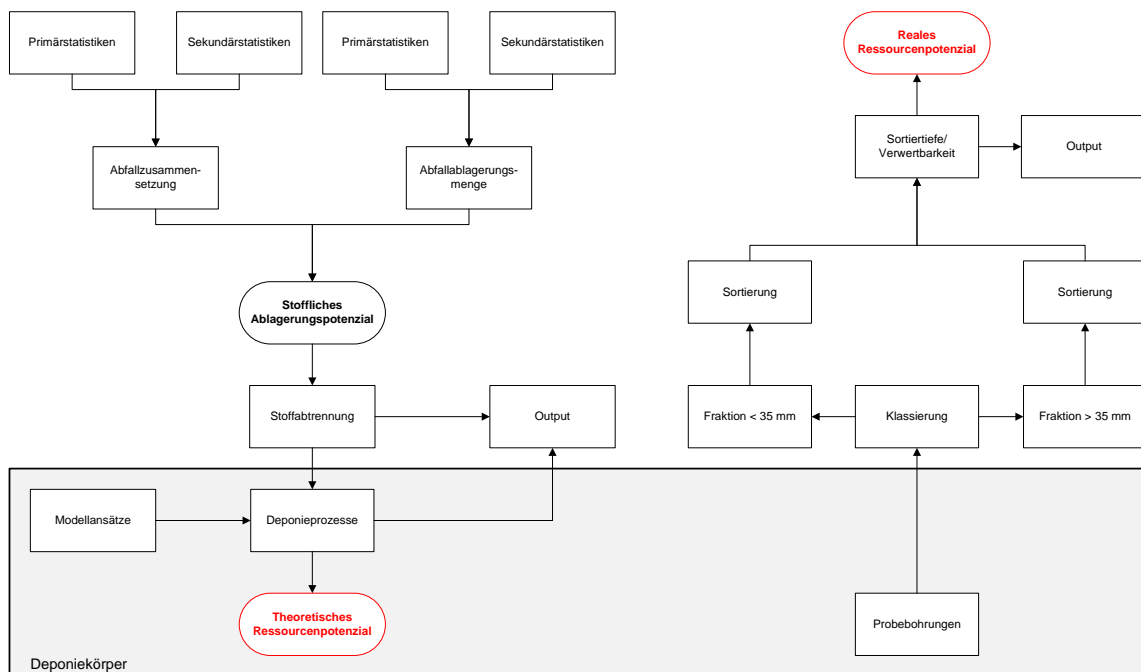


ABBILDUNG 26: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER MODELLSCHITTE DES THEORETISCHEN UND REALEN RESSOURCENPOTENZIALS

THEORETISCHES RESSOURCENPOTENZIAL

Das theoretische Ressourcenpotenzial beruht auf zeitspezifischen Primär- und Sekundärstatistiken, die die abfallwirtschaftliche Situation des Einzugsgebiets einer Deponie charakterisieren und bestimmen. Dabei liegen sämtliche Daten, die in die Modellierung einfließen, bereits in Form von Literaturwerten, Untersuchungsergebnissen anderer Projekte, betriebseigenen Datenbanken, Höhenmodellen der Massenermittlung oder Archivmaterial vor. Die daraus ermittelten spezifischen Ablagerungsmengen und Abfallzusammensetzungen bilden die Grundlage der theoretischen Potenzialermittlung. Zudem werden die Abbau- und Umbauprozesse einzelner Stoffgruppen innerhalb des Deponiekörpers simuliert und in die Berechnung integriert [GÄTH & NISPEL, 2011].

REALES RESSOURCENPOTENZIAL

Neben der theoretischen Abschätzung des Ressourcenpotenzials einer Deponie können durch direkte Deponiegutuntersuchungen in Form von Sortieranalysen Erkenntnisse zum stofflichen Inhalt des Deponiekörpers gewonnen werden. Die Verschneidung vorhandener Ablagerungsmengen mit den Erkenntnissen zum lagespezifischen Vorkommen einzelner Abfallarten und deren charakteristischer Zusammensetzung liefert letztlich das reale Ressourcenpotenzial einer Deponie [GÄTH & NISPEL, 2011].

ABLAGERUNGSPOTENZIAL

Unter dem Begriff Ablagerungspotenzial wird eine vereinfachte Form des theoretischen Ressourcenpotenzials verstanden. Hierbei fließen in die Betrachtung keine Annahmen zu Ab- und Umbauprozessen innerhalb des Deponiekörpers ein.

4.2.1 PHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN

4.2.1.1 WASSERGEHALT UND TROCKENMASSE

Im Vergleich zum in der Bodenkunde gängigen Wassergehalt drückt der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Wassergehalt den Wasserverlust zur Masse des nassen Materials aus. Die Bestimmung des Wassergehalts erfolgte dabei identisch zur gravimetrischen Bestimmung des Wassergehalts nach DIN 38414-2 [1985].

FORMEL 12: BESTIMMUNG DES WASSERGEHALTES

$$WG = 100 * \frac{M_n - M_t}{M_n}$$

Mit:

WG: Wassergehalt [Gew.-%]

M_n: Masse des nassen Material [g]

M_t: Masse des bei 105 °C getrockneten Materials [g]

Die Trockenmasse berechnet sich im Umkehrschluss aus der Masse des nassen Materials und dem Wassergehalt nach der Formel:

$$M_t = M_n * \left(1 - \frac{WG}{100}\right)$$

Mit:

WG: Wassergehalt [Gew.-%]

M_n: Masse des nassen Material [g]

M_t: Masse des bei 105 °C getrockneten Materials [g]

Die Ermittlung des Wassergehalts- bzw. der Trockenmasse erfolgte einerseits für die Mischproben der Fein- sowie Grobfraktion und andererseits in 3-facher Wiederholung für 10 der 14 separierten Stoffgruppenproben. Im Fall der Stoffgruppenproben konnten aufgrund zu geringer Probemengen die Fraktionen Verbundverpackungen, Komplexe-Produkte und Problemabfälle nicht separat untersucht werden. Aufgrund ihrer stofflichen Ähnlichkeit zu anderen ausgewiesenen und untersuchten Stofffraktionen können jedoch Rückschlüsse auf deren Wassergehalt gezogen werden. Insgesamt wurde somit für 21 Mischproben der Feinfraktion, 21 Mischproben der Grobfraktion und 30 Einzelproben der Stoffgruppen die Wassergehaltsbestimmung durchgeführt.

4.2.1.2 GLÜHVERLUST

Die Ermittlung des Glühverlustes ist ein gravimetrisches Standardverfahren zur Bestimmung des Gehalts an organischer Substanz. Hierbei wird eine bei 105 °C getrocknete Probe bis zur Gewichtskonstanz bei 500 °C geglüht [DIN 19684-3, 2000]. Die Gegenüberstellung des Gewichtsunterschieds vor und nach dem Glühen in Bezug auf die Masse der ofentrockenen Probe ist dabei das Maß für den Gehalt an organischem Kohlenstoff einer Probe [ROWELL, 1994].

$$GV = 100 * \frac{M_t - M_g}{M_t}$$

Mit:

GV: Glühverlust [Gew.-%]

M_t: Masse der bei 105 °C getrockneten Probe [g]

M_g: Masse der bei 500 °C geglühten Probe [g]

4.2.1.3 HEIZWERTBERECHNUNG

Deponiegut, das stoffbedingt hohe Energiegehalte aufweist bzw. die so genannte heizwertreiche Fraktion, ist zur Herstellung von EBS (Ersatzbrennstoffen) geeignet. Neben Schadstoffgehalten ergibt sich die Eignung eines Abfalls zur Herstellung von EBS aus seinem Energiegehalt, ausgedrückt als Brenn- bzw. Heizwert. Die Definition beider Begriffe ist in DIN 5499 [1972] zu finden. Die experimentelle Bestimmung erfolgt in diesem Zusammenhang nach DIN 51900 [2004].

Neben der experimentellen Bestimmung des Brennwertes und der anschließenden Heizwertberechnung existieren empirisch ermittelte Formeln, welche den Heizwert direkt aus der elementaren Zusammensetzung des jeweiligen Brennstoffes berechnen [BOIE, 1957].

Beim Vergleich von gemessenen mit berechneten Werten konnte gezeigt werden, dass hohe Regressionskoeffizienten zwischen 0,95 und 0,98 vorliegen und somit eine sehr gute Abschätzung stattfindet [KOST, 2001].

Im Rahmen dieser Arbeit wurden daher folgende Ansätze verfolgt, wobei die elementare Zusammensetzung der einzelnen Stofffraktionen der Literatur [KOST, 2001] entnommen wurde:

- [MICHEL, 1938]
 $H_o = 34.889 C + 124.348 H - 10.467 O + 6.280 N + 19.092 S$
- [DULONG, zitiert nach COOPER ET AL., 1999]
 $H_o = 33.827 C + 144.267 H - 18.033 O + 9.420 S$
- [NELLES, 1998]
 $H_o = 49.646 C - 2.707,6$

Die aufgeführten Modelle bilden die Grundlage zur Berechnung des Brennwertes. Der angenommene Bezugszustand heizwertreicher Fraktionen der Formel ist dabei die wasserfreie Probe, ausgedrückt als Brennwert $H_{o(wf)}$. Aus diesem errechnet sich der Heizwert der wasserfreien Probe $H_{u(wf)}$ nach folgender Formel:

FORMEL 15: BERECHNUNG DES HEIZWERTS DER WASSERFREIEN SUBSTANZ [KOST, 2001]

$$H_{u(wf)} = H_{o(wf)} - 2,441 * 9h_{(wf)}$$

mit:

$H_{u(wf)}$	Heizwert der wasserfreien Substanz [$kJ*kg^{-1}$]
$H_{o(wf)}$	Brennwert der wasserfreien Substanz [$kJ*kg^{-1}$]
$h_{(wf)}$	Anteil des Wasserstoffs der wasserfreien Substanz, Zahl zwischen 0 und 1

Der Heizwert $H_{u(wf)}$ der wasserfreien Substanz stellt somit den maximal erreichbaren Heizwert einer Stoffgruppe bei einer theoretisch vollständigen Trocknung dar. Dem gegenüber bezieht sich der Heizwert $H_{u(roh)}$ auf die ungetrocknete Probe. Er berechnet sich aus dem Heizwert der wasserfreien Substanz nach folgender Formel:

FORMEL 16: BERECHNUNG DES HEIZWERTS DER UNGETROCKNETEN DEPONIEGUTPROBE [KOST, 2001]

$$H_{u(roh)} = H_{u(wf)} * (1 - w) - 2,441 * w$$

mit:

$H_{u(roh)}$	Heizwert der ungetrockneten Substanz [$kJ*kg^{-1}$]
w	Anteil Wasser (H_2O) [g Wasser* g ungetrocknete Substanz $^{-1}$]

Die stofffraktionsspezifische Zusammensetzung der heizwertreichen Fraktion bildete die Grundlage zur Berechnung des theoretischen Heizwertes der Gesamtfraktion durch Multiplikation der jeweiligen Massenanteile mit den Einzelheizwerten der Stoffgruppen. Die abschließende Aufsummierung dieser Werte bildet den theoretischen Gesamtheizwert der heizwertreichen Fraktion der Kreismülldeponie Hechingen [REIMANN & HÄMMERLI, 1995].

CHLORGEHALT

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein theoretischer Chlorgehalt der gesamten heizwertreichen Fraktion bestimmt. Dazu wurden stoffgruppenspezifische Daten der Literatur entnommen und aufgrund der in der Sortieranalyse erhobenen prozentualen Anteile [Gew.-% TM] der genannten Stoffgruppen angerechnet.

4.2.2 THEORETISCHES RESSOURCENPOTENZIAL

Das theoretische Ressourcenpotenzial beschreibt das fiktiv vorhandene Rohstoffpotenzial einer Deponie auf Basis der Verschneidung allgemein gültiger sowie einzugspezifischer primärer und sekundärer Daten zur Abfallwirtschaft. Hierunter fallen unter anderem folgende Kenngrößen:

- volumen- und/oder massenspezifische Ablagerungsmengen
- Erhebungen zum spezifischen Abfallaufkommen des Einzugsgebiets
- Massenermittlungen des Deponiekörpers – Deponiekörpervermessungen
- zeitspezifische Analysen der Abfallzusammensetzung einzelner Abfallarten
- Umstellungen im Sammelsystem bzw. Satzungsänderungen
- Aussagen von Zeitzeugen
- Auswertung vorhandener Luftbilddaufnahmen und Fotodokumentationen
- Struktur des Einzugsgebiets
- Konsumverhalten und –entwicklung.

4.2.2.1 HAUSMÜLLZUSAMMENSETZUNG

Im Rahmen der Analyse der zeitspezifischen Zusammensetzung von Hausmüll wurden insgesamt ca. 150 westdeutsche Hausmülluntersuchungen zusammengetragen und in einer Datenbank vereinheitlicht. Hierdurch ist es möglich, eine zeitlich differenzierte Abschätzung der Rohstofffrachten auf den Deponiekörper abzugeben.

Aufgrund mangelnder Strukturdaten zum Einzugsgebiet der Kreismülldeponie Hechingen können zur Abschätzung des theoretischen Ressourcenpotenzials nur allgemein gültige Annahmen getroffen werden.

4.2.2.2 GEWERBEABFALLZUSAMMENSETZUNG

Die Zusammensetzung von Gewerbeabfällen ist im Wesentlichen durch die Branchenstruktur des betrachteten Untersuchungsgebiets geprägt. Diese stellt sich wie folgt dar:

TABELLE 21: PROZENTUALE BRANCHENZUSAMMENSETZUNG DES ZOLLERNALBKREISES

Branchenstruktur	2009	2008	2007	2006	Mittelwert
Baugewerbe	3,34%	3,26%	3,26%	3,23%	3,27%
Dienstleistung	43,09%	42,29%	41,12%	40,80%	41,82%
Handel	21,89%	22,42%	22,88%	23,16%	22,59%
Öffentliche Einrichtungen	7,33%	7,36%	7,36%	7,28%	7,33%
Sonstige Wirtschaftszweige	1,79%	1,68%	1,77%	1,65%	1,72%
Textilindustrie	3,06%	3,26%	3,58%	3,84%	3,43%
Verarbeitendes Gewerbe	19,50%	19,74%	20,04%	20,05%	19,83%

Die Analyse des Rohstoffpotenzials aus Gewerbeabfällen berücksichtigt hierbei die in Tabelle 21 genannte mittlere prozentuale Branchenzusammensetzung und setzt sie mit entsprechenden branchenspezifischen Auswertungen zur Gewerbeabfallzusammensetzung in Verbindung. Datengrundlage stellt hierbei ebenfalls die aufgebaute Literaturdatenbank dar. Aufgrund fehlender Strukturdaten wird die zeitliche Variation der Branchenverteilung nicht berücksichtigt.

4.2.2.3 SPERRMÜLL- UND BAUSCHUTTZUSAMMENSETZUNG

In der Literatur finden sich nur wenige Untersuchungen, die die Zusammensetzung von Sperrmüll und Bauschutt charakterisieren. Aus diesem Grund ist es im Bereich des Sperrmülls und Bauschutts nicht möglich, zeitspezifische Variationen der Zusammensetzung darzustellen. Für die Abschätzung des theoretischen Ressourcenpotenzials wird daher eine mittlere Zusammensetzung dieser Abfälle angenommen.

4.2.3 REALES RESSOURCENPOTENZIAL

In Verbindung mit der Errichtung sechs neuer Deponiegasbrunnen im Oktober des Jahres 2009 und drei weiterer Grundwasserbrunnenbohrungen² im Juli des Jahres 2011, wurden Untersuchungen zur lagespezifischen stofflichen Zusammensetzung des Deponiekörpers sowie zu den chemisch-physikalischen Eigenschaften des Deponieguts durchgeführt.

4.2.3.1 LAGE UND TIEFE DER UNTERSUCHUNGEN

Die Auswahl der Lage der zu errichtenden Deponiegasbrunnen wurde ausschließlich auf Basis des zu erwartenden Deponiegas- und Grundwasserpotenzials bestimmt. Einen Überblick über die Verteilung der neuen Deponiegas- und Grundwasserbrunnen und somit der untersuchten Deponiebereiche gibt Abbildung 27. Es wird deutlich, dass sich die Gasbrunnen BI/1 – 5 und BII/1 sowie BII/3 im jüngeren Abschnitt des Deponiebereichs I befinden. Lediglich Gasbrunnen BI/6 und BII/2 wurden am Rand des älteren und bereits rekultivierten unteren Deponieabschnitts errichtet.

² Dienen der Überwachung potenzieller Belastungen des Grundwassers durch Deponiesi Wasserhaushaltes der Kreismülldeponie Hechingen.

Abbildung des

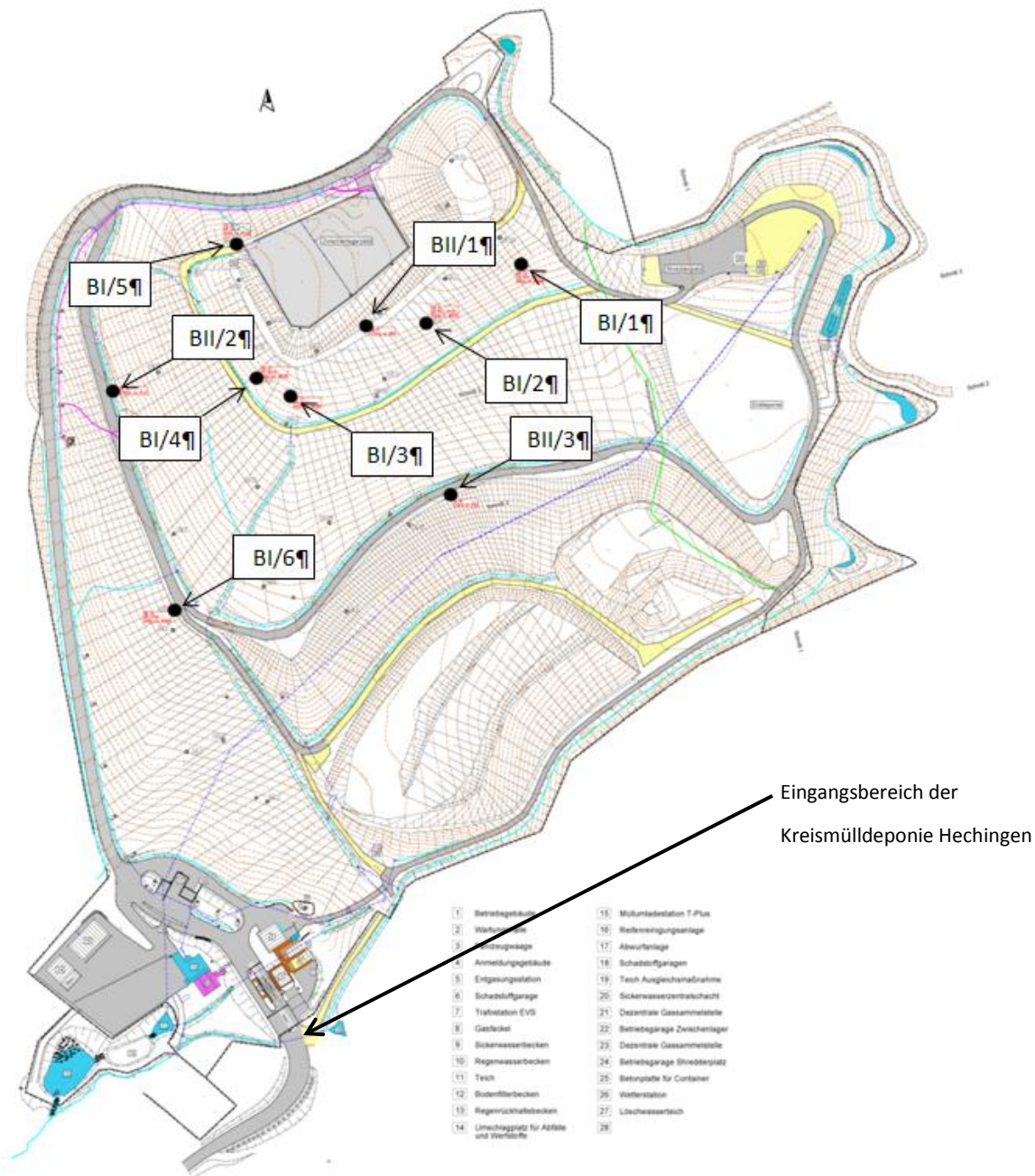


ABBILDUNG 27: ÜBERSICHTSPLAN ZUR LAGE DER BOHRPUNKTE DER BOHRSTAFFEL I (BI/1 - 6) UND DER BOHRSTAFFEL II (BII/1 - 3) AN DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

Unter Beachtung der anstehenden Basisabdichtung konnten für die jeweiligen Bohrpunkte die in Abbildung 28 gezeigten Endtiefen erreicht werden. Aufgrund von Wasserlinsen innerhalb des Deponiekörpers, die eine Beprobung des Deponieguts zur späteren Klassierung und Sortierung unmöglich machten, mussten für die einzelnen Bohrlöcher unterschiedliche Beprobungsabschnitte gewählt werden. Hierbei sollte - soweit realisierbar - ein Tiefenabstand der Probenahmestellen von 3 m nicht überschritten werden. Der Untersuchungsumfang beläuft sich für Bohrstaffel I auf 21 und für Bohrstaffel II auf 14 unterschiedliche Deponieregionen, die im Weiteren als Probenchargen bezeichnet werden. Es ist zu berücksichtigen, dass aufliegendes Bodenmaterial (BI/1/0 - BI/6/0 sowie BII/1/0 - BII/3/0) keiner weiteren Untersuchung zugeführt wurde und nicht zum Untersuchungsumfang zählt.

Bohrstafel:		I						II		
Bohrloch:	BI/1	BI/2	BI/3	BI/4	BI/5	BI/6	BII/1	BII/2	BII/3	
0,5	BI/1/0	BI/2/0	BI/3/0	BI/4/0	BI/5/0	BI/6/0	BII/1/0	BI/2/0	BI/3/0	
1,0										
1,5										
2,0			BI/3/1							
2,5				BI/4/1						
3,0										
3,5	BI/1/1								BI/3/1	
4,0										
4,5			BI/3/2				BII/1/1			
5,0										
5,5				BI/4/2			BII/1/2			
6,0										
6,5		BI/2/1			BI/5/1			BI/2/1		
7,0										
7,5			BI/3/3			BI/6/1	BII/1/3		BI/3/2	
8,0	BI/1/2									
8,5							BII/1/4			
9,0										
9,5							BII/1/5			
10,0										
10,5			BI/3/4	BI/4/3			BII/1/6			
11,0										
11,5					BI/5/2	BI/6/2	BII/1/7			
12,0										
12,5	BI/1/3									
13,0							BII/1/8			
13,5			BI/3/5	BI/4/4						
14,0							BII/1/9			
14,5					BI/5/3					
15,0										
15,5		BI/2/2								
16,0										
16,5			BI/3/6	BI/4/5						
17,0										
17,5										
18,0										
18,5										
19,0										
19,5										
20,0										
20,5										
21,0										
21,5										
22,0										
22,5										
23,0									BI/3/3	
23,5										
24,0										
24,5							BII/1/10			
25,0										
25,5										
26,0										
26,5										
27,0										
27,5										
28,0										
28,5										
29,0										
29,5										
30,0										

ABBILDUNG 28: BOHRLOCHSPEZIFISCHE TIEFENBEREICHE DER DEPONIEGUTUNTERSUCHUNGEN

TABELLE 22: BOHRLOCHSPEZIFISCHE TIEFENBEREICHE DER DEPONIEGUTUNTERSUCHUNGEN

Bohrloch	Tiefenstufe	Sortierkennung	Tiefe			GOK ü.NN [m]	Untersuchungsbereich ü.NN	
			von [m]	bis [m]	Bereich [m]		von	bis
BI/1	0	BI/1/0	0,0	3,0	3,0	613,4	613,4	610,4
	1	BI/1/1	3,0	7,5	4,5	613,4	610,4	605,9
	2	BI/1/2	7,5	12,0	4,5	613,4	605,9	601,4
	3	BI/1/3	12,0	16,0	4,0	613,4	601,4	597,4
BI/2	0	BI/2/0	0,0	6,0	6,0	612,2	612,2	606,2
	1	BI/2/1	6,0	15,0	9,0	612,2	606,2	597,2
	2	BI/2/2	15,0	20,0	5,0	612,2	597,2	592,2
BI/3	0	BI/3/0	0,0	1,5	1,5	605,4	605,4	603,9
	1	BI/3/1	1,5	4,0	2,5	605,4	603,9	601,4
	2	BI/3/2	4,0	7,0	3,0	605,4	601,4	598,4
	3	BI/3/3	7,0	10,0	3,0	605,4	598,4	595,4
	4	BI/3/4	10,0	13,0	3,0	605,4	595,4	592,4
	5	BI/3/5	13,0	16,0	3,0	605,4	592,4	589,4
	6	BI/3/6	16,0	19,0	3,0	605,4	589,4	586,4
BI/4	0	BI/4/0	0,0	2,0	2,0	604,1	604,1	602,1
	1	BI/4/1	2,0	5,0	3,0	604,1	602,1	599,1
	2	BI/4/2	5,0	10,0	5,0	604,1	599,1	594,1
	3	BI/4/3	10,0	13,0	3,0	604,1	594,1	591,1
	4	BI/4/4	13,0	16,0	3,0	604,1	591,1	588,1
	5	BI/4/5	16,0	20,0	4,0	604,1	588,1	584,1
BI/5	0	BI/5/0	0,0	6,0	6,0	606,0	606,0	600,0
	1	BI/5/1	6,0	11,0	5,0	606,0	600,0	595,0
	2	BI/5/2	11,0	14,0	3,0	606,0	595,0	592,0
	3	BI/5/3	14,0	17,0	3,0	606,0	592,0	589,0
BI/6	0	BI/6/0	0,0	7,0	7,0	578,8	578,8	571,8
	1	BI/6/1	7,0	11,0	4,0	578,8	571,8	567,8
	2	BI/6/2	11,0	15,0	4,0	578,8	567,8	563,8
BI/1	0	BI/1/0	0,0	4,0	4,0	612,0	612,0	608,0
	1	BI/1/1	4,0	5,0	1,0	612,0	608,0	607,0
	2	BI/1/2	5,0	7,0	2,0	612,0	607,0	605,0
	3	BI/1/3	7,0	8,0	1,0	612,0	605,0	604,0
	4	BI/1/4	8,0	9,0	1,0	612,0	604,0	603,0
	5	BI/1/5	9,0	10,0	1,0	612,0	603,0	602,0
	6	BI/1/6	10,0	11,0	1,0	612,0	602,0	601,0
	7	BI/1/7	11,0	12,5	1,5	612,0	601,0	599,5
	8	BI/1/8	12,5	13,5	1,0	612,0	599,5	598,5
	9	BI/1/9	13,5	16,0	2,5	612,0	598,5	596,0
S.n.m.		16,0	24,0	8,0	612,0	596,0	588,0	
10	BI/1/10	24,0	30,0	6,0	612,0	588,0	582,0	
BI/2	0	BI/2/0	0,0	6,0	6,0	583,0	583,0	577,0
	1	BI/2/1	6,0	9,0	3,0	583,0	577,0	574,0
BI/3	0	BI/3/0	0,0	3,0	3,0	589,2	589,2	586,2
	1	BI/3/1	3,0	7,0	4,0	589,2	586,2	582,2
	2	BI/3/2	7,0	12,0	5,0	589,2	582,2	577,2
	S.n.m.		12,0	22,0	10,0	589,2	577,2	567,2
3	BI/3/3	22,0	24,0	2,0	589,2	567,2	565,2	

4.2.3.2 BOHRVERFAHREN

Wie bereits bei der Lage und Tiefe der zu errichtenden Deponiegas- und Grundwasserbrunnen beschrieben, stand das Bohrverfahren bereits im Vorfeld der Deponiegutuntersuchungen fest. Hierbei handelte es sich um das so genannte Schneckenbohrverfahren mit temporärer Hilfsverrohrung. Aufgrund unterschiedlicher technischer Anforderungen an Deponiegas- und Grundwasserbrunnen betrug der Bohrdurchmesser der ersten Bohrstaffel ca. 0,75 m und der der zweiten Bohrstaffel ca. 0,40 m. Einen Eindruck des eingesetzten Bohrgeräts vermittelt Abbildung 29.



ABBILDUNG 29: LINKS: BOHRSTAFFEL I - KETTENBAGGER MIT BOHRAUFSATZ | RECHTS: BOHRSTAFFEL II – SELBSTFAHRENDES KLEINBOHRGERÄT

Anschließend wurde das geförderte Deponiegut bzw. die jeweilige Probencharge in die Schaufel eines Radladers verbracht, der das Material zur in-situ Klassiereinrichtung transportierte.

4.2.3.3 IN-SITU KLASSIERUNG UND SORTIERUNG

Untersuchungen auf anderen Deponien haben gezeigt, dass es vor der eigentlichen Sortierung sinnvoll ist, das Deponiegut einer Klassierung zu unterziehen. Eine Maschenweite von 40 mm hat sich nach Angaben der Literatur als praktikabel erwiesen. Aufgrund technischer Gegebenheiten kam zur Klassierung der Probenchargen während der Sortierversuche auf der Kreismülldeponie Hechingen ein einstufiges mobiles Trommelsieb mit einer Maschenweite von 35 mm zum Einsatz.

Die so gewonnene Feinfraktion < 35 mm wurde anschließend zur Anteilsbestimmung verwogen. Für nachgeschaltete Labor- und Sortieruntersuchungen wurden zudem repräsentative Einzelproben nach Maßgabe der LAGA PN 98 [2004] entnommen. Eine in-situ Sortierung dieser Fraktion fand nicht statt.

Die Grobfraktion > 35 mm wurde hinsichtlich eines zuvor aufgestellten Fraktionskatalogs manuell in-situ sortiert, wobei für entsprechende Nachuntersuchungen dieser Fraktion ebenfalls repräsentative Misch- und stoffspezifische Einzelproben nach Maßgabe der LAGA PN 98 [2004] entnommen wurden.

Die Sortierung der Grobfraktion der ersten Bohrstaffel beinhaltet dabei die in Tabelle 23 dargestellten und charakterisierten Stoffgruppen. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurde dieser Katalog im Rahmen der Bohrstaffel II erweitert. Hierbei wurde die Gruppe der Kunststoffe in Kunststofffolien, Hartkunststoffe und Gummi untergliedert. Im Anschluss an die manuelle Sortierung einer Probencharge wurden die Fraktionsanteile gravimetrisch bestimmt.

TABELLE 23: STOFFGRUPPENKATALOG DER SORTIERUNTERSUCHUNGEN NACH ANGABEN DES SÄCHSISCHEN LANDESAMTES FÜR UMWELT UND GEOLOGIE [1998]

Stofffraktion	Nähere Charakterisierung
Fe-Metalle:	Getränkedosen; Konservendosen; Fe-Aerosoldosen; Umreifungsbänder; Sonst. Fe-Metalle
NE-Metalle:	Alu-Dosen; Alu-Aerosoldosen; Sonst. Alu-Verpackungen; NE-Verschlüsse; Blei-Kapseln; Cu-Rohre; Sonst. NE-Metalle
Pappe, Papier, Kartonage:	Pappe; Papier; Kartonagen; Einweggeschirr; Zeitschriften; Illustrierte; Bücher; Administrationspapiere; Pappmöbel; Papiertapeten; Sonst. PPK
Glas:	Weißglas; Braunglas; Grünglas; Glas-Verpackungen; Röhrenglas; Trinkgläser; Medizinische Gläser; Flachglas; Sonst. Gläser
Kunststoffe:	Becher; Blister; Folien; Schaumstoffe; Hohlkörper; Einweggeschirr; Umreifungsbänder; Fensterrahmen; Rohre; Dämmmaterialien; Kunststoffmöbel; Sonst. Kunststoffe
Organik:	Fleisch, Fisch, Knochen; Gekochte Speisereste; Laub; Rasenschnitt; Schnitt- und Topfblumen; Hygienepapiere
Holz:	Holz-Verpackungen; Holzmöbel; Sonst. Hölzer
Textilien:	Bekleidungstextilien; Haustextilien (Decken, Handtücher etc.); Heimtextilien (Gardinen, Teppiche etc.); Produktionsspezifische Textilien
Mineralstoffe (kein Glas):	Keramik; Porzellan; Sonstige Mineralstoffe
Verbund-Verpackung:	Papier-Verbunde; Kunststoff-Verbunde; Alu-Verbunde; Getränkekartonagen; Sonst. Verbundverpackungen
Verbunde (komplexe Produkte):	Elektronikschrott; Polstermöbel; Matratzen; Sonst. Verbundmöbel; Fahrzeugteile; Holz-Metall-Verbunde; Kunststoff-Metall-Verbunde; Holz-Metall-Textilien-Verbunde
Problemabfälle:	Batterien; Akkumulatoren; Altmedikamente; Altchemikalien; Altölhaltige Materialien; Sonstige schadstoffbelastete Stoffe
Stoffe ang.:	Leder; Gummi; Kork; Altschuhe; Windeln; Sonst. Hygieneprodukte
Sortierreste:	Den übrigen Fraktionen vor Ort nicht zuzuordnen/Stoffgemische

4.2.3.4 PROBENAHME UND PROBENUMFANG

Aufgrund der Tatsache, dass die Volumina der zu beprobenden Grundmengen sowohl bei der Feinfraktion als auch bei dem unsortierten Material der Grobfraktion geringer als 1 m³ waren, wurden abweichend von der PN 98 die Grundmengen der Korngrößenfraktion je Deponiegutcharge zusammengetragen, mit einer Schaufel durchmischt, mehrmals umgesetzt und anschließend zu einem kegelstumpfförmigen Haufwerk aufgeschichtet. Durch abschließendes Aufkegeln und Vierteln bis zur verjüngten Laborprobe wurden so repräsentative Proben für die spätere Analytik und Nachsortierung mit einem Volumen zwischen 30 - 40 l bei der Grobfraktion und ca. 10 l bei der Feinfraktion aus der Grundmenge gewonnen.

Der Probenumfang der ersten Bohrstaffel belief sich dabei auf 42 Einzelproben, die sich in jeweils 21 Proben des unsortierten Materials der Grobfraktion und der Feinfraktion unterteilten. Zusätzlich wurden den sortierten Fraktionen stoffspezifische Proben zur weiteren Analyse entnommen.

Aufgrund von Problemen³ während der zweiten Bohrstaffel war es ausschließlich möglich, repräsentative und verwertbare Proben der Deponiegutchargen BII/1/1 bis BII/1/9 zu entnehmen. Diese untergliedern sich wiederum in jeweils 9 Proben des unsortierten Materials der Grob- und Feinfraktion.

Die verbleibenden Deponiegutchargen der Bohrstaffel II wurden ebenfalls beprobt und hinsichtlich des Wassergehalts untersucht. Jedoch ist aufgrund der Lagerungsdauer und daraus resultierender Verfälschungen des ursprünglichen Wassergehalts keine Übertragbarkeit auf den Deponiekörper gegeben.

³ Die Bohrungen schritten aufgrund von Meißelarbeiten nur sehr langsam voran, sodass beschlossen wurde, das Deponiegut zwischenzulagern und nach Abschluss der Bohrarbeiten zu untersuchen. Durch Witterungseinflüsse können in Bezug auf den Wassergehalt des Deponieguts keine Parallelen auf den Deponiekörper gezogen werden.

Abschließend gibt Tabelle 24 einen Überblick über die im Rahmen der Sortieranalysen untersuchten Deponiegutmengen.

TABELLE 24: UNTERSUCHTE MENGEN DER EINZELNEN DEPONIEGÜTCHARGEN

Bohrloch	Tiefenstufe	Bezeichnung	Gesamtuntersuchungsmenge [kg FM]	Probemenge Feinfraktion [kg FM]	Probemenge Grobfraktion [kg FM]
BI/1	0	BI/1/0	Keine Untersuchung	Keine Untersuchung	Keine Untersuchung
	1	BI/1/1	517,05	2,55	3,17
	2	BI/1/2	786,37	2,41	4,14
	3	BI/1/3	143,50	2,28	0,31
		Gesamt	1.446,92	7,23	7,62
BI/2	0	BI/2/0	Keine Untersuchung	Keine Untersuchung	Keine Untersuchung
	1	BI/2/1	585,67	2,23	6,75
	2	BI/2/2	296,19	1,53	4,49
	Gesamt	881,85	3,75	11,24	
BI/3	0	BI/3/0	Keine Untersuchung	Keine Untersuchung	Keine Untersuchung
	1	BI/3/1	121,70	1,20	4,94
	2	BI/3/2	246,15	1,86	9,12
	3	BI/3/3	123,50	1,17	1,69
	4	BI/3/4	108,14	1,13	1,97
	5	BI/3/5	246,39	1,75	5,51
	6	BI/3/6	247,48	2,22	5,61
	Gesamt	1.093,37	9,34	28,83	
BI/4	0	BI/4/0	Keine Untersuchung	Keine Untersuchung	Keine Untersuchung
	1	BI/4/1	68,25	1,36	3,59
	2	BI/4/2	136,36	1,84	3,77
	3	BI/4/3	92,27	1,30	3,51
	4	BI/4/4	133,77	2,23	6,53
	5	BI/4/5	70,30	2,36	5,96
	Gesamt	500,95	9,09	23,35	
BI/5	0	BI/5/0	Keine Untersuchung	Keine Untersuchung	Keine Untersuchung
	1	BI/5/1	168,26	1,58	9,09
	2	BI/5/2	255,03	1,32	5,07
	3	BI/5/3	229,27	1,83	4,84
	Gesamt	652,55	4,74	19,00	
BI/6	0	BI/6/0	Keine Untersuchung	Keine Untersuchung	Keine Untersuchung
	1	BI/6/1	92,36	1,41	5,21
	2	BI/6/2	211,67	1,89	7,90
	Gesamt	304,03	3,30	13,11	
BI/1	0	BI/1/0	Keine Untersuchung	Keine Untersuchung	Keine Untersuchung
	1	BI/1/1	75,96	2,12	3,96
	2	BI/1/2	33,20	1,54	2,99
	3	BI/1/3	203,24	1,75	3,87
	4	BI/1/4	194,55	1,35	3,54
	5	BI/1/5	192,30	1,58	3,99
	6	BI/1/6	297,23	1,36	3,41
	7	BI/1/7	414,94	1,47	4,12
	8	BI/1/8	346,32	1,44	3,68
	S.n.m.				
9	BI/1/9	836,85	4,19	3,74	
	Gesamt	2594,59	16,80	33,30	
BI/2*	0	BI/2/0	Keine Untersuchung	Keine Untersuchung	Keine Untersuchung
	1	BI/2/1	311,89	4,70	7,02
		Gesamt	311,89	4,70	7,02
BI/3*	0	BI/3/0	Keine Untersuchung	Keine Untersuchung	Keine Untersuchung
	1	BI/3/1	690,61	5,93	5,92
	2	BI/3/2	863,08	9,10	5,81
	S.n.m.				
3	BI/3/3	185,87	4,93	5,02	
	Gesamt	1.739,57	19,96	16,75	

* Wassergehalt wurde ermittelt, kann jedoch nur indirekt eingesetzt werden

4.2.3.5 NACHSORTIERUNG DER SORTIERRESTE DER GROBFRAKTION

Im Rahmen der Arbeiten zeigte sich, dass aufgrund zeitlicher Begrenzungen die Fraktion Sortierreste große Anteile an der Gesamtzusammensetzung ausmachte. Aus diesem Grund wurde entschieden, diese Fraktion im Rahmen von Nachsortierungen detaillierter zu charakterisieren. Im Rahmen der Nachsortierung der Sortierreste wurde ebenfalls auf den in Tabelle 23 dargestellten Fraktionskatalog zurückgegriffen.

4.2.3.6 NACHKLASSIERUNG UND SORTIERUNG DER FEINFRAKTION

Aufgrund des hohen Anteils der Feinfraktion an der Gesamtzusammensetzung wurde zur weiteren Charakterisierung dieses Materials eine Nachsortierung vorgenommen. Hierzu wurden den zuvor gewonnenen Probenchargen Teilmengen entnommen und mittels Rundsieb (Lochweite 5 mm) in die Fraktionen < 5 mm und 5 – 35 mm klassiert. Zur Auflösung von Verklumpungen und somit zur vollständigen und fehlerfreien Klassierung wurde in diesem Zusammenhang das Material mittels Wasser durch das Sieb gewaschen.

Die gewonnene Mittelfraktion (5 – 35 mm) wurde anschließend hinsichtlich des aufgestellten Stoffgruppenkatalogs sortiert, wobei ausschließlich Kunststoffe, Glas, Textilien, Holz, Mineralien, Fe- und NE-Metalle auftraten.

Auf die weitere Sortierung der Fraktion < 5 mm musste aus technischen Gründen verzichtet werden. Bei dieser Fraktion handelt es sich im Wesentlichen um Mineralien, Holzfasern und organische Bestandteile.

Abschließend veranschaulicht Abbildung 30 den zuvor beschriebenen zweistufigen Prozess der Klassier- und Sortieranalysen.

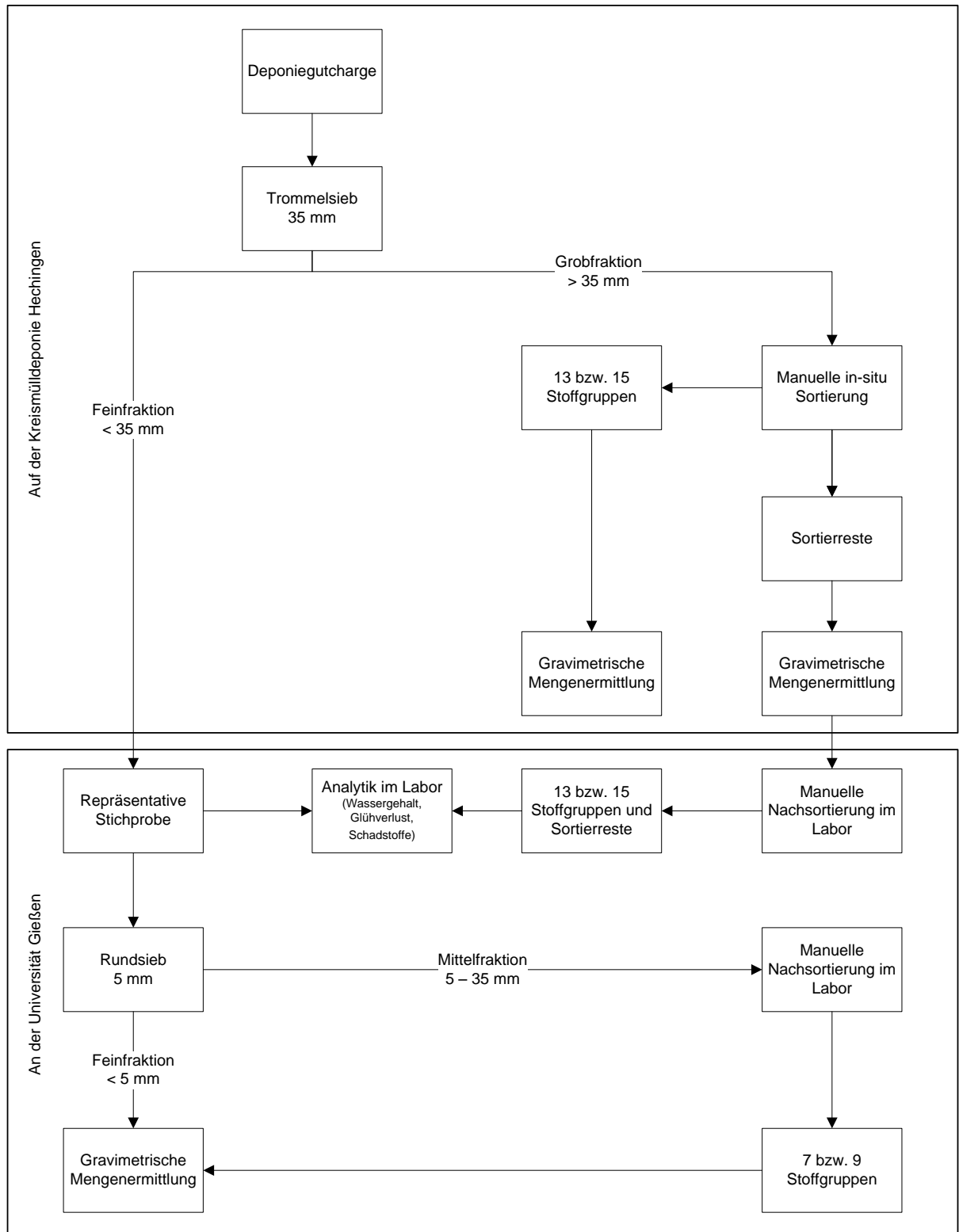


ABBILDUNG 30: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES UNTERSUCHUNGSABLAUFS JE DEPONIEGUTCHARGE

4.2.4 LABORTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN

ELUTIONS- UND EXTRAKTIONSVERFAHREN

Zur Bestimmung der Mobilisierbarkeit von Schadstoffen aus Abfällen, Böden und Ersatzbaustoffen existieren unterschiedliche Elutionsverfahren, mit deren Hilfe die Zuordnung eines Materials zu einer Deponieklasse oder dessen Verwertungsmöglichkeiten z.B. als Ersatzbaustoff in technischen Bauwerken bestimmt werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit kamen das

- Elutionsverfahren nach DIN EN 12457-4 [2003] und das
- Elutionsverfahren nach DIN 19529 [2009]

zum Einsatz. Hierbei wurde die Fraktion < 35 mm hinsichtlich ihrer Eluierbarkeit untersucht.

Zudem wurden ausgewählte Sortierfraktionen der Fraktion > 35 mm einer Königswasserextraktion unterzogen. Diese diente zur Vorbereitung der Bestimmung der Gehalte an anorganischen Schadstoffen im Feststoff. Tabelle 25 fasst die eingesetzten Methoden vergleichend zusammen und ordnet sie den geltenden Regelwerken zu.

TABELLE 25: VERGLEICHENDE ZUSAMMENSTELLUNG DER EINGESetzten LABORUNTERSUCHUNGEN ZUR STOFFLICHEN CHARAKTERISIERUNG DER FEINFRAKTION UND AUSGEWÄHLTER STOFFFRAKTIONEN

Schütteltest [DIN EN 12457-4, 2003] DepV	Schütteltest [DIN 19529, 2009] ErsatzbaustoffV	Königswasseraufschluss [DIN EN 13657, 2003] RAL-GZ 724
Korngröße < 40 mm	Korngröße < 2 mm / < 10 mm	Korngröße < 250 µm
90 g Feststoff	100 g / 250 g Feststoff	0,2 g - 0,5 g Feststoff
900 ml Reinstwasser	200 ml / 500 ml Reinstwasser	6 ml HCl + 2 ml HNO ₃
Flüssig-/Feststoffverhältnis 10:1	Flüssig-/Feststoffverhältnis 2:1	Flüssig-/Feststoffverhältnis 40:1 - 16:1
24 Stunden Schütteln	24 Stunden Schütteln	20 min Mikrowellenaufschluss
Zentrifugieren	Zentrifugieren	ggf. Zentrifugieren
Membranfiltration 0,45 µm	Membranfiltration 0,45 µm	Faltenfilter 8 µm

Eine ausführliche Material- und Methodenbeschreibung der angewendeten Elutionsverfahren ist den angegebenen Quellen zu entnehmen.

5 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

5.1 ABLAGERUNGSMENGE

Die Ablagerungsmenge oder auch das potenzielle Ablagerungsvolumen eines Deponiekörpers ist ein entscheidender Faktor für die Beurteilung des Ressourcenpotenzials einer Deponie, da basierend auf dieser Größe sämtliche Folgeabschätzungen beruhen.

Neben der Gesamtablagerungsmenge spielt dabei aufgrund wandelnder Rahmenbedingungen der Abfallbeseitigung und -wirtschaft auch die zeitliche Variation eine entscheidende Rolle.

In diesem Zusammenhang haben abfallwirtschaftliche Maßnahmen im Zollernalbkreis zu einer völligen Umkehrung der Mengenverhältnisse geführt. So sind Abfälle zur Beseitigung stark zurückgegangen und im Gegenzug Abfälle zur Verwertung stark angestiegen. Die größten Umstellungen gab es in den Jahren 1991 bis 1995, in denen ein Großteil der im Abfallwirtschaftskonzept entwickelten Maßnahmen umgesetzt wurde. Diese Entwicklungen spiegeln sich deutlich in den nachfolgenden Abbildungen wider [ZOLLERNALBKREIS, 2010].

5.1.1 JAHRESSPEZIFISCHE VARIATION

Im Bereich der Hausmüllablagerung ist ein deutlicher Rückgang der Ablagerungsmenge in den Jahren 1991 bis 1993 zu verzeichnen. So lagen die jährlichen Ablagerungsmengen für Hausmüll 1982 bis 1991 noch bei ca. 52.000 Mg FM*a⁻¹ und fielen anschließend in den Jahren 1992 bis 1995 auf ca. 20.000 Mg FM*a⁻¹ ab. An dieser Situation änderte sich bis zum Jahr 2000 nichts. In den Folgejahren können weitere leichte Rückgänge verzeichnet werden. Die drastische Mengenreduzierung im Jahr 2005 ist letztlich durch das Ablagerungsverbot unvorbehandelter Abfälle zu erklären. Die Varianz der untersuchten Szenarien (vergl. Kapitel 4.1) ist vergleichsweise gering (Abbildung 31).

Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass die Datengrundlage der Hausmüllablagerung eine hohe Qualität sowie Aussagekraft besitzt und eine repräsentative bzw. realistische Grundlage für die weitere Potenzialermittlung darstellt.

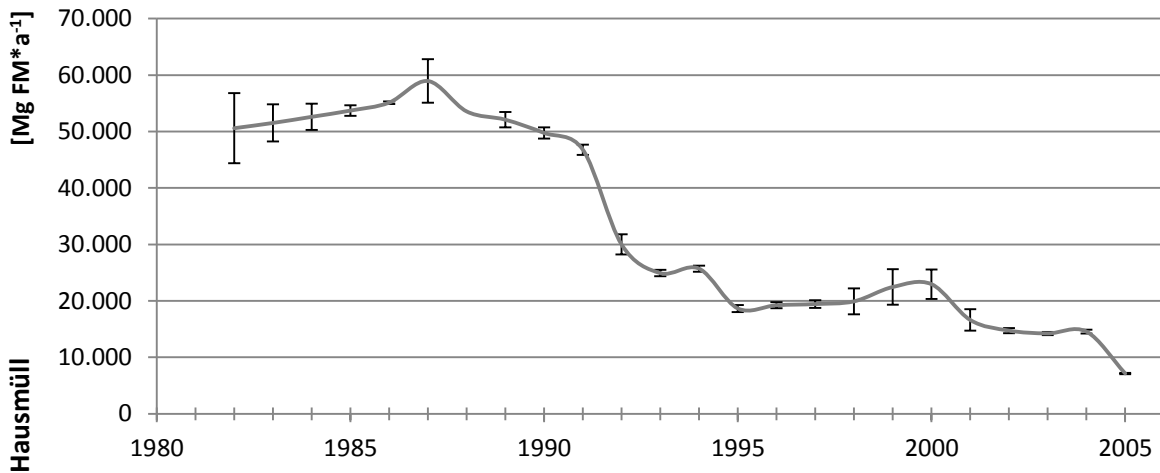


ABBILDUNG 31: JÄHRLICHE ABLAGERUNG VON HAUSMÜLL AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN UND DEREN VARIATION (STANDARDABWEICHUNG DER SZENARIEN)

Die Ablagerung von Gewerbeabfällen zeigt hingegen vor allem im Bereich der frühen Ablagerungsjahre deutlichere Variationen der untersuchten Szenarien. Dennoch ist die Ablagerungsmenge mit ca. 45.000 Mg FM*a⁻¹ bis zum Jahr 1987 relativ konstant. In den beiden Folgejahren sinkt sie um etwa 10.000 Mg FM*a⁻¹ ab, steigt jedoch in den anschließenden Jahren auf ein ähnliches Niveau wie zuvor an. Die Jahre 1992 bis 1998 sind durch einen stetigen Rückgang geprägt, der im Jahr 1998 mit ca. 10.000 Mg FM*a⁻¹ zu charakterisieren ist und in den Folgejahren anhält (Abbildung 32).

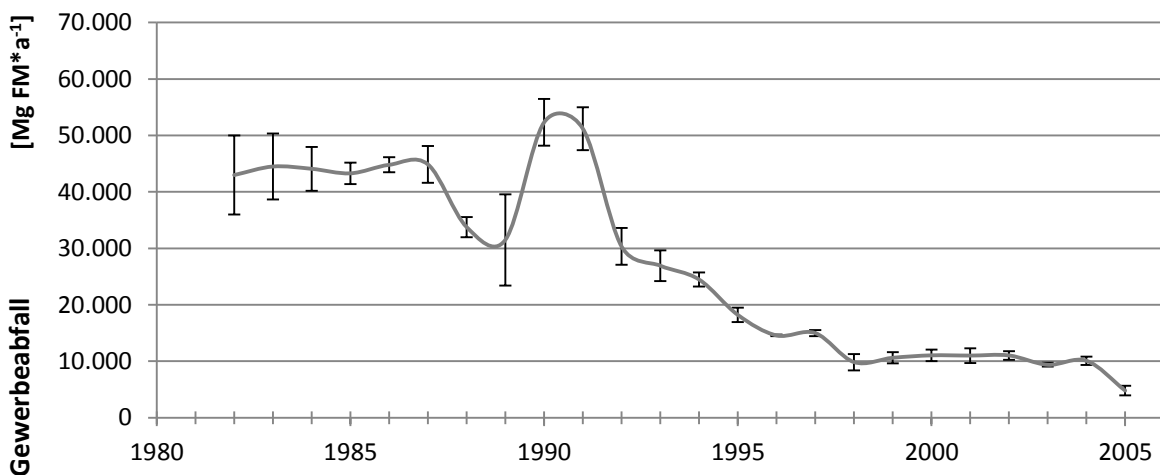


ABBILDUNG 32: JÄHRLICHE ABLAGERUNG VON GEWERBEABFALL AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN UND DEREN VARIATION (STANDARDABWEICHUNG DER SZENARIEN)

Bauschutt zeichnet sich in den Jahren von 1982 bis 2003 mit Mengen um 15.000 Mg FM*a⁻¹ aus, die mit Ablagerungseinbrüchen in den Jahren 1988, 1989, 1998 und 2000 verbunden sind. Eine deutliche Steigerung der abgelagerten Bauschuttmenge ist hingegen in den letzten beiden Ablagerungsjahren zu erkennen. So wurden im Jahr 2005 etwa 70.000 Mg FM*a⁻¹ Bauschutt deponiert. Die Variationen der einzelnen Szenarien fallen auch hier vergleichsweise gering aus (Abbildung 33).

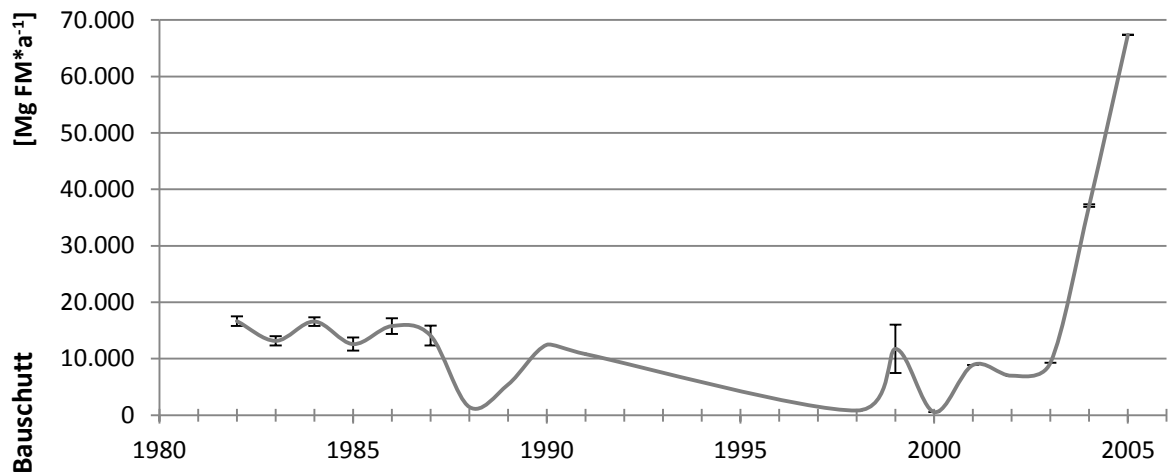


ABBILDUNG 33: JÄHRLICHE ABLAGERUNG VON BAUSCHUTT AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN UND DEREN VARIATION (STANDARDABWEICHUNG DER SZENARIEN)

Die Ablagerung von Schlämmen hat sich in den Jahren von 1982 bis 1991 stetig gesteigert. Im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Abfallarten fällt die Ablagerung von Schlämmen jedoch mit maximal ca. 19.000 Mg FM*a⁻¹ deutlich geringer aus. Die Jahre 1992 bis 1998 zeichnen sich durch einen nahezu kontinuierlichen Rückgang der Schlammablagerung aus, die am Ende dieser Periode bei lediglich 70 Mg FM*a⁻¹ liegt und bis auf wenige Ausnahmen auch in den darauffolgenden Jahren in diesem Bereich bleibt. Die Variation der einzelnen Szenarien kann als mäßig eingestuft werden, wobei größere Abweichungen im Jahr 1999 zu verzeichnen sind (Abbildung 34).

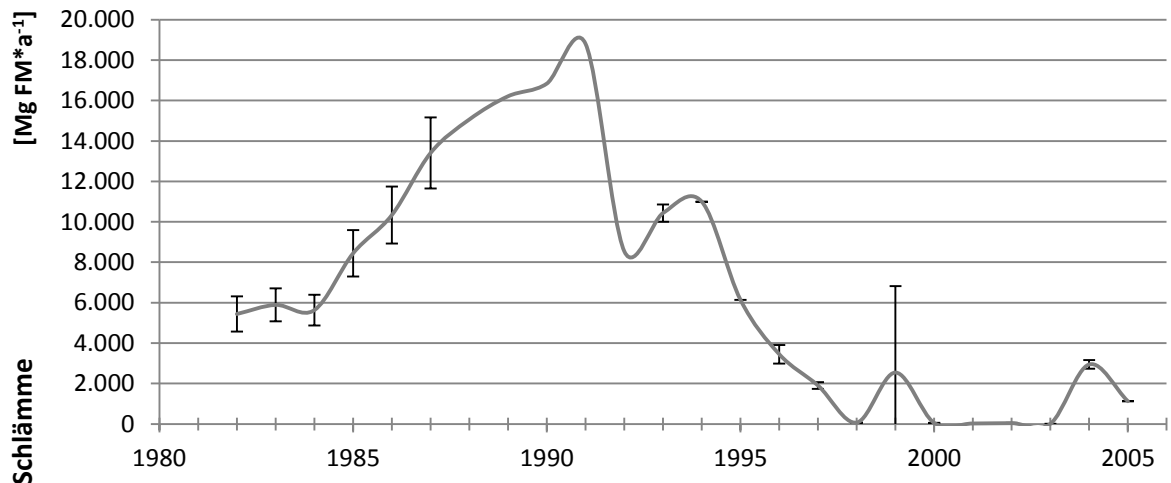


ABBILDUNG 34: JÄHRLICHE ABLAGERUNG VON SCHLÄMMEN AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN UND DEREN VARIATION (STANDARDABWEICHUNG DER SZENARIEN)

Wie bereits im Fall der Ablagerung von Schlämmen macht die deponierte Menge an Sperrmüll mit 2.000 bis 4.000 Mg FM*a⁻¹ einen vergleichsweise geringen Anteil der jahresspezifischen Ablagerungsmenge aus. Geprägt ist die Ablagerung von Sperrmüll im Wesentlichen durch drei Zeitabschnitte, die sich von 1982 bis 1988, 1988 bis 1995 und 1995 bis 2005 erstrecken. Hierbei

liegen die Ablagerungsmengen im ersten Abschnitt bei ca. 4.000 Mg FM*a⁻¹. Der zweite Abschnitt ist durch einen rasch wachsenden Anstieg der Sperrmülldeponierung gekennzeichnet, der mit ca. 9.000 Mg FM*a⁻¹ im Jahr 1990 seinen Höhepunkt findet und in der anschließenden Epoche auf ein konstantes Niveau von 3.000 Mg FM*a⁻¹ abfällt (Abbildung 35).

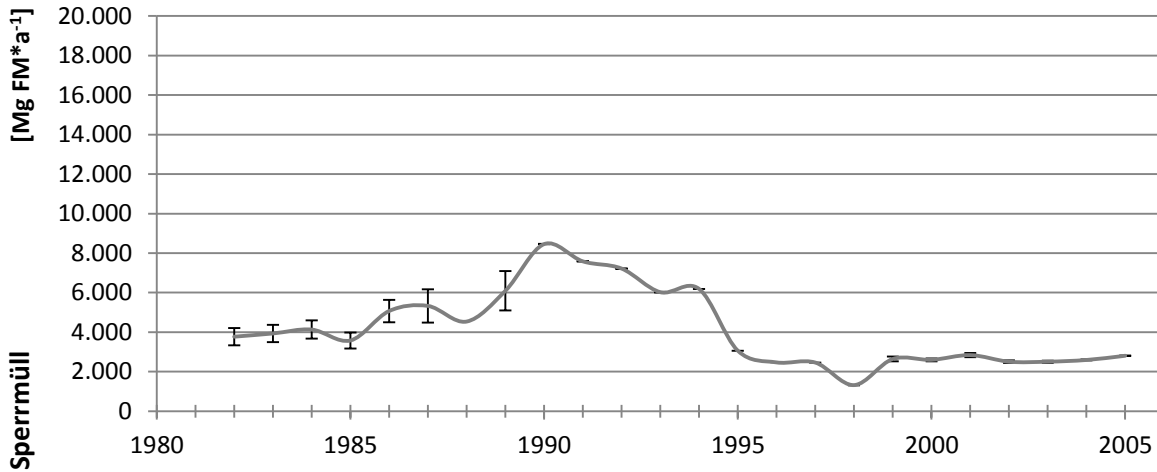


ABBILDUNG 35: JÄHRLICHE ABLAGERUNG VON SPERRMÜLL AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN UND DEREN VARIATION (STANDARDABWEICHUNG DER SZENARIEN)

Die Deponierung von Sanden ist durch ein einheitliches Bild gekennzeichnet. Die jährliche Ablagerungsmenge pendelt bei ca. 3.000 Mg FM*a⁻¹ und variiert von Szenario zu Szenario vergleichsweise stark (Abbildung 36).

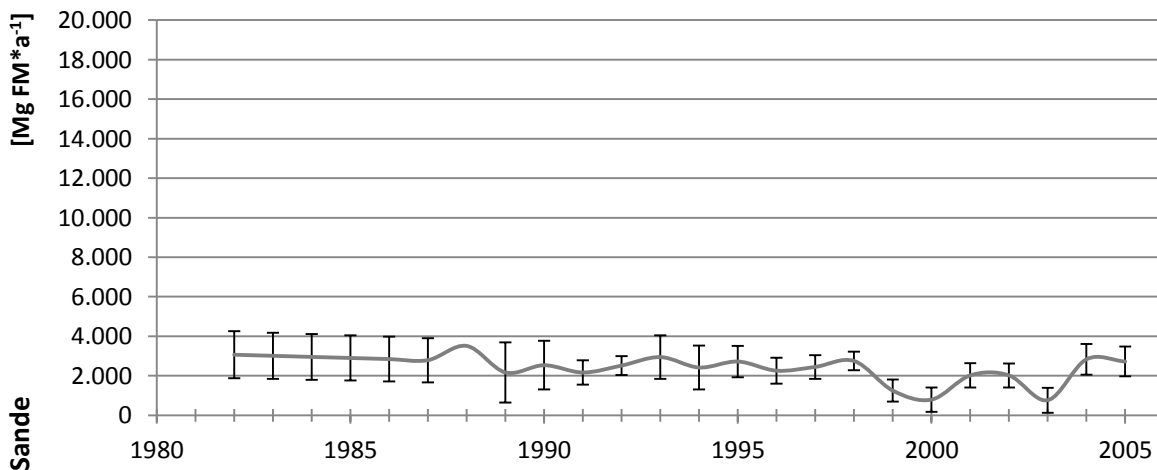


ABBILDUNG 36: JÄHRLICHE ABLAGERUNG VON SANDEN AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN UND DEREN VARIATION (STANDARDABWEICHUNG DER SZENARIEN)

Die Verfüllung oder Abdeckung des Deponiekörpers mit Rekultivierungsmaterialien kann erst ab dem Jahr 2000 verzeichnet werden. In diesem Zusammenhang ist ein stetiger Anstieg dieser Materialien festzustellen, was sich aus der Schaffung von Kontur- und Ausgleichsschichten ergibt (Abbildung 37).

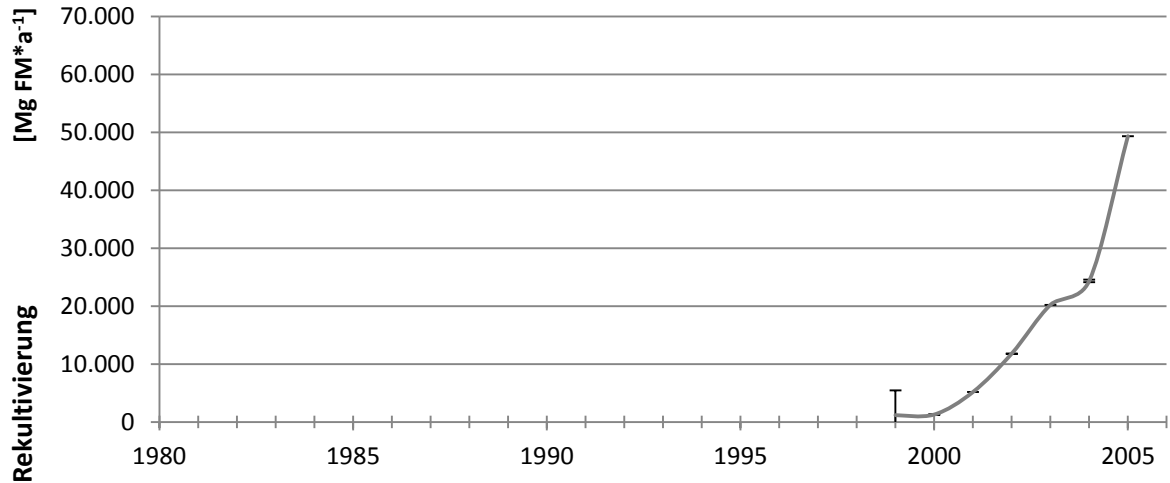


ABBILDUNG 37: JÄHRLICHE ABLAGERUNG VON REKULTIVIERUNGSMATERIAL AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN UND DEREN VARIATION (STANDARDABWEICHUNG DER SZENARIEN)

Die jahresspezifische Gesamtablagerungsmenge stellt sich wie in Abbildung 38 aufgezeigt dar. Hierbei wird in den Jahren 1982 bis 1991 mit 110.000 – 140.000 Mg FM*a⁻¹ ein relativ konstantes Niveau gehalten. Im darauffolgenden Jahr fällt die Ablagerungsmenge jedoch um etwa 40 % ab und sinkt bis 1998 stetig. In diesem Jahr liegt mit ca. 35.000 Mg FM*a⁻¹ zudem das Minimum der Gesamtablagerungsmenge. In den Folgejahren bis 2003 ist zwar ein leichter Anstieg der Ablagerungsmenge zu verzeichnen, dieser wird aber durch den starken Anstieg in den Jahren 2004 und 2005 relativiert. Es werden erneut Ablagerungsmengen von 100.000 – 140.000 Mg FM*a⁻¹ erreicht, die im Wesentlichen durch mineralische Abfälle geprägt sind. Die Variation der untersuchten Szenarien wird in diesem Zusammenhang aus Anhang 11 und 12 deutlich.

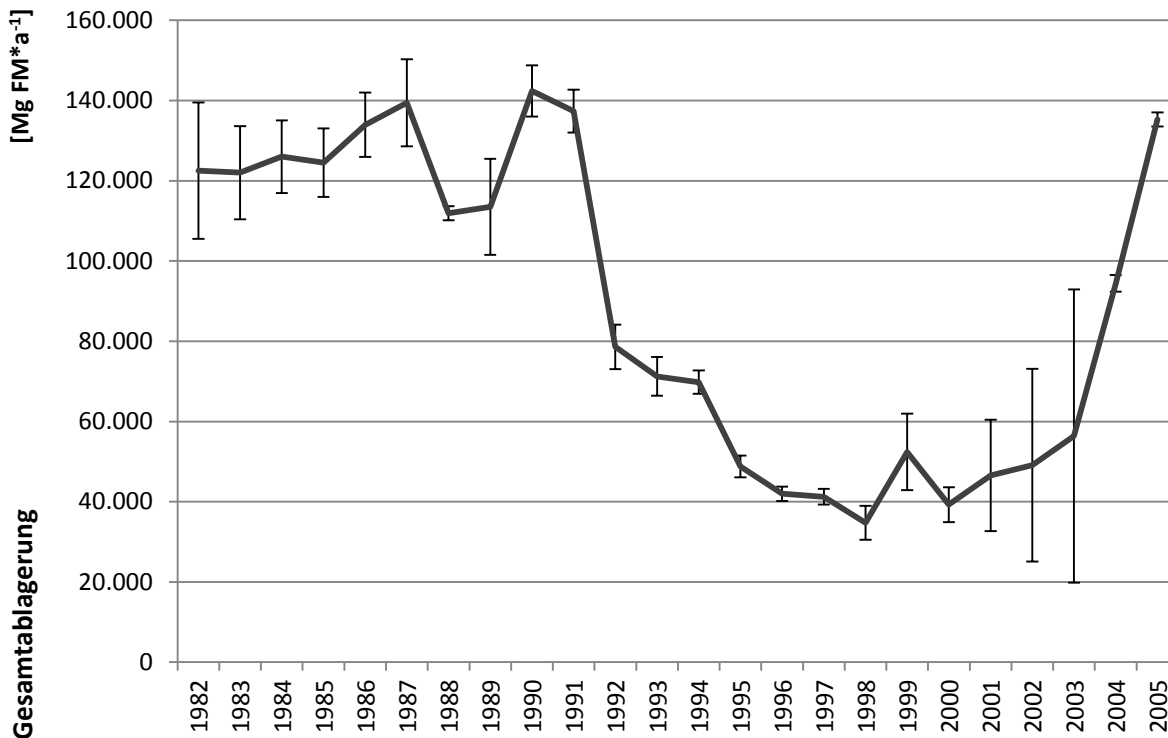


ABBILDUNG 38: JÄHRLICHE GESAMTABLAGERUNGSMENGE VON ABFÄLLEN AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER MENGENVARIATION

Aus Abbildung 39 werden die jahresspezifischen Anteile der Abfallarten an der Gesamtabfallablagerung deutlich. Im Bereich des Hausmülls zeigt sich, dass diese Abfallfraktion in den Jahren 1982 bis 2001 zwischen 35 und 50 Gew.-% der FM ausmacht. Dieser relativ konstante Anteil verringert sich in den Endjahren der Betrachtung drastisch, sodass im Jahr 2005 lediglich 5 Gew.-% der insgesamt abgelagerten FM aus Hausmüll bestehen.

Eine gegensätzliche Entwicklung besitzen Bauschutt und Rekultivierungsmaterialien. Diese zeigen im zeitlichen Verlauf eine nahezu stetige Steigerung der prozentualen Ablagerungsmenge auf. Im Jahr 2005 nehmen diese beiden Abfallarten etwa 86 Gew.-% FM der Gesamtablagerungsmenge ein.

Gewerbeabfälle besitzen für den Zeitraum von 1982 bis 2002 mit einem durchschnittlichen Anteil von ca. 32 Gew.-% FM einen relativ konstanten Ablagerungsanteil. In den drei folgenden Jahren sinkt der Anteil jedoch drastisch auf etwa 4 Gew.-% FM.

Schlämme sind mit 1 – 6 Gew.-% FM anteilmäßig gesehen die geringste Fraktion. Die jährliche Variation ist entsprechend niedrig. Gleiches gilt für die Abfallart Sperrmüll.

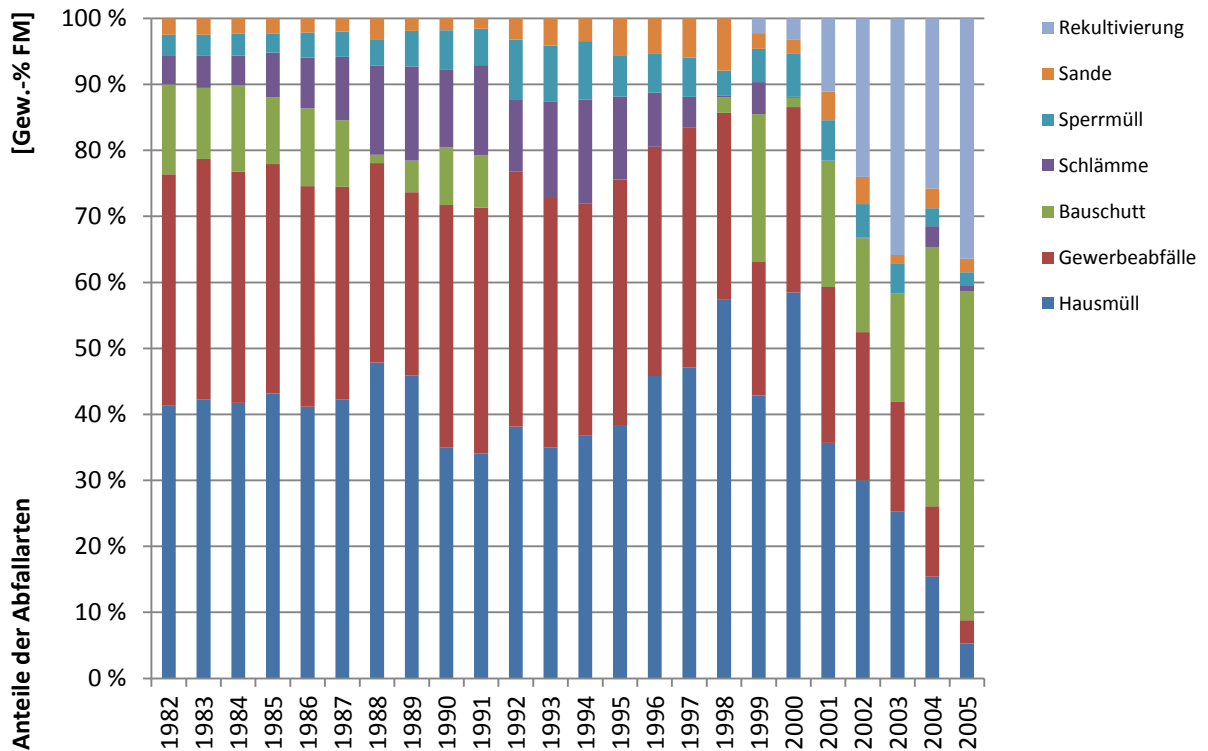


ABBILDUNG 39: SPEZIFISCHE ANTEILE DER ABFALLARTEN AN DER JÄHRLICHEN GESAMTABLAGERUNG AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

5.1.2 GESAMTABLAGERUNGSMENGEN

Die Aufsummierung der zuvor aufgestellten jahresspezifischen Ablagerungsmengen ergibt die Gesamtablagerungsmenge auf der Kreismülldeponie Hechingen. Hierbei machen Abfälle aus Haushalten im Mittel etwa 800.000 Mg bzw. 37 Gew.-% der FM aus. Die nächst größere Ablagerungsmenge liegt mit ca. 640.000 Mg der FM im Bereich der Gewerbeabfälle. Anteilsmäßig sind dies ca. 30 Gew.-% FM des Deponiekörpers. Bauschutt ist in Mengen von 262.000 Mg FM im Deponiekörper zu vermuten, was etwa 12 Gew.-% entspricht. Die Abfallfraktion Schlämme macht ca. 8 Gew.-% bzw. 164.000 Mg der FM des Deponiekörpers aus. Sperrmüll und Materialien zur Rekultivierung zeigen Anteile von jeweils ca. 5 Gew.-% FM, also etwa 100.000 Mg FM, auf. Hierneben fand die Ablagerung von Sanden in einer Größenordnung von 58.000 Mg FM, die etwa 3 Gew.-% entsprechen, statt (siehe Tabelle 26 und Anhang 12).

TABELLE 26: GESAMTABLAGERUNGSMENGE AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN NACH ABFALLARTEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG ABGELEITETER MINIMALER, MITTLERER UND MAXIMALER ABLAGERUNGSMENGEN

Gesamtablagerungsmengen nach Abfallarten								
	Hausmüll	Gewerbeabfall	Sperrmüll	Sande	Schlämme	Bauschutt	Rekultivierungs- material	Gesamt- ablagerung
Szenario	[Mg FM]	[Mg FM]	[Mg FM]	[Mg FM]	[Mg FM]	[Mg FM]	[Mg FM]	[Mg FM]
Szenario MIN	758.905	589.114	95.580	39.071	155.732	238.193	83.223	1.959.818
Szenario MW	795.373	640.683	99.715	58.384	164.338	261.837	113.306	2.133.638
Szenario MAX	824.422	696.475	104.003	73.953	175.088	285.481	143.389	2.302.811

Auf Basis der gewonnenen Ergebnisse können für die weitere Betrachtung der theoretischen und realen Potenzialabschätzung die in Tabelle 26 definierten Szenarien angenommen werden. Hierbei schwankt die abgeleitete Gesamtablagerungsmenge von ca. 1,9 bis 2,3 Mio. Mg FM.

Neben den betrachteten mittleren Ablagerungsmengen der einzelnen Abfallarten ist die Variation der aufgestellten Szenarien entscheidend. Hierbei zeigt sich in Bezug auf die jeweilige Abfallart, dass Sande und Materialien zur Rekultivierung mit 34 bis 38 Gew.-% FM die höchsten Abweichungen aufzeigen. Diese Tatsache relativiert sich jedoch aufgrund der geringen Ablagerungsanteile an der Gesamtablagerungsmenge. Der Variationskoeffizient ist in diesem Fall mit 1 bis 2 % als gering einzustufen.

Insgesamt ergibt sich aus Abbildung 40, dass die einzelnen Szenarien in Bezug auf die Gesamtablagerungsmenge nur geringe Variationen aufzeigen. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die im Rahmen der Studie modellierten Ablagerungsmengen eine realitätsnahe Abschätzung darstellen.

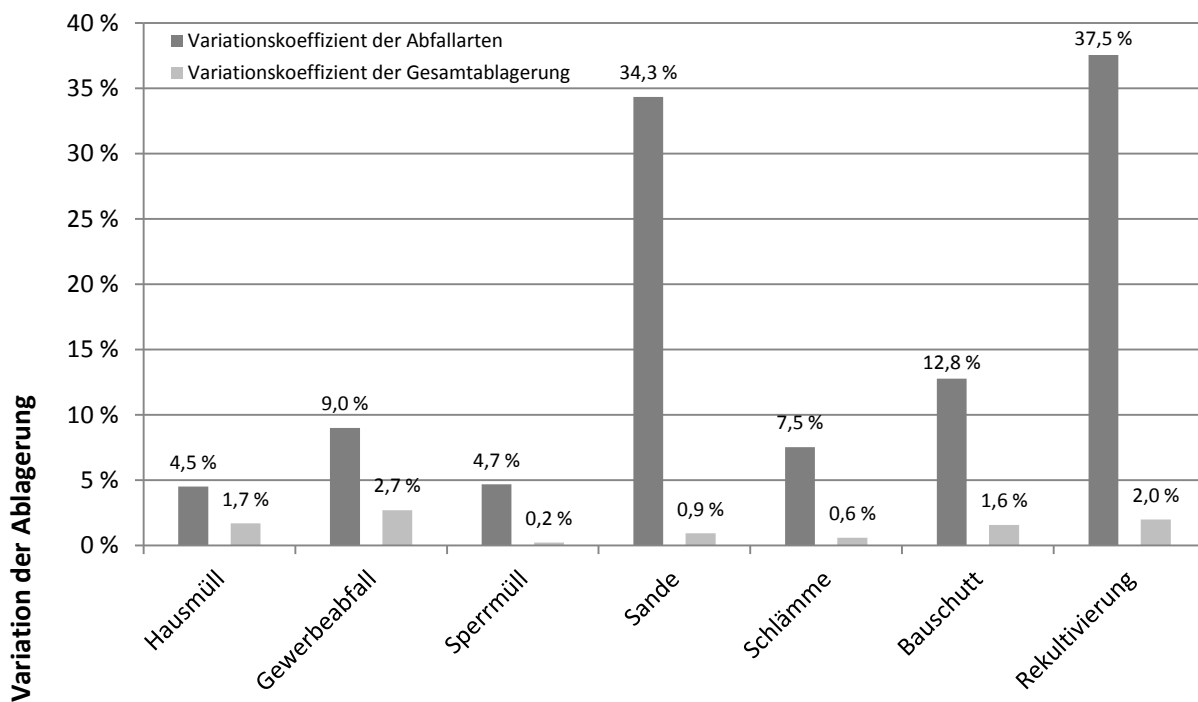


ABBILDUNG 40: MENGENVARIATION INNERHALB DER EINZELNEN ABFALLARTEN UND IN BEZUG AUF DIE MITTLERE GESAMTABLAGERUNGSMENGE AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

5.1.3 VOLUMENERMITTLUNG

Zusätzlich zu den aufgezeigten massenbezogenen Ablagerungsmengen bieten Vermessungen des Deponiekörpers bzw. Volumenermittlungen eine Möglichkeit zur Abschätzung der jahresspezifischen Ablagerungsmenge. Eine Unterscheidung einzelner Abfallarten ist hierbei jedoch nicht möglich.

Die Auswertung der Daten zur spezifischen Volumenermittlung lässt folgende Schlussfolgerungen zu (siehe Abbildung 41 und Anhang 13):

- Die Ablagerung von Abfällen auf der Kreismülldeponie Hechingen lässt sich in zwei Phasen unterteilen.
- Phase I erstreckt sich in diesem Zusammenhang von 1982 bis 1991 und zeichnet sich durch tägliche Einbauvolumina von ca. 428 m³ FM*d⁻¹ aus.
- Phase II (1992 bis 2004) zeigt mit mittleren Einbauvolumina von etwa 115 m³ FM*d⁻¹ deutlich geringere Ablagerungsanteile auf.
- Erklärt werden kann diese drastische Ablagerungsänderung durch die in Abbildung 41 aufgezeigten Änderungen der Abfallwirtschaft innerhalb des Einzugsgebiets der Kreismülldeponie Hechingen.

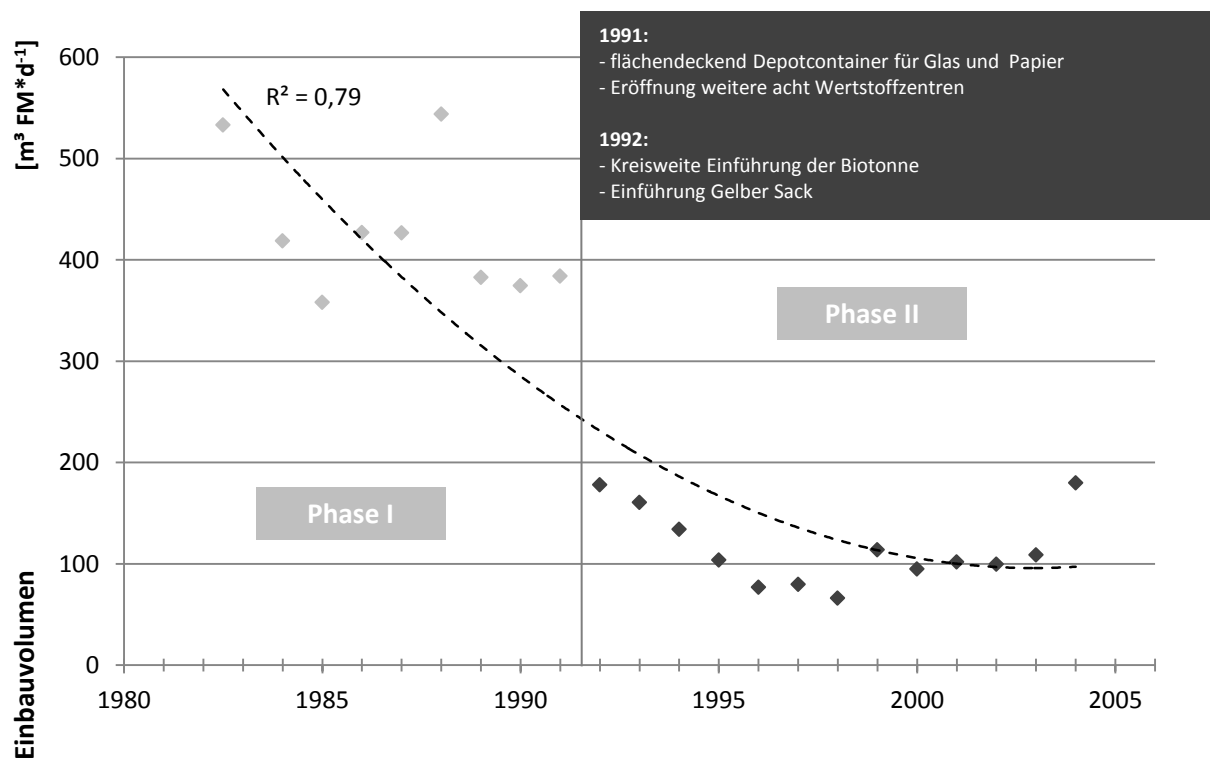


ABBILDUNG 41: SPEZIFISCHES ABLAGERUNGSVOLUMEN UND PHASEN DER ABFALLDEPONIERUNG AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

Durch die Gegenüberstellung der massen- und volumenbezogenen Ablagerungsmengen, die unabhängig voneinander erhoben wurden, wird eine zusätzliche Validierung der gewonnenen Erkenntnisse erreicht. In diesem Kontext verdeutlicht Abbildung 42 mit R² = 92 % deren eindeutigen Zusammenhang.

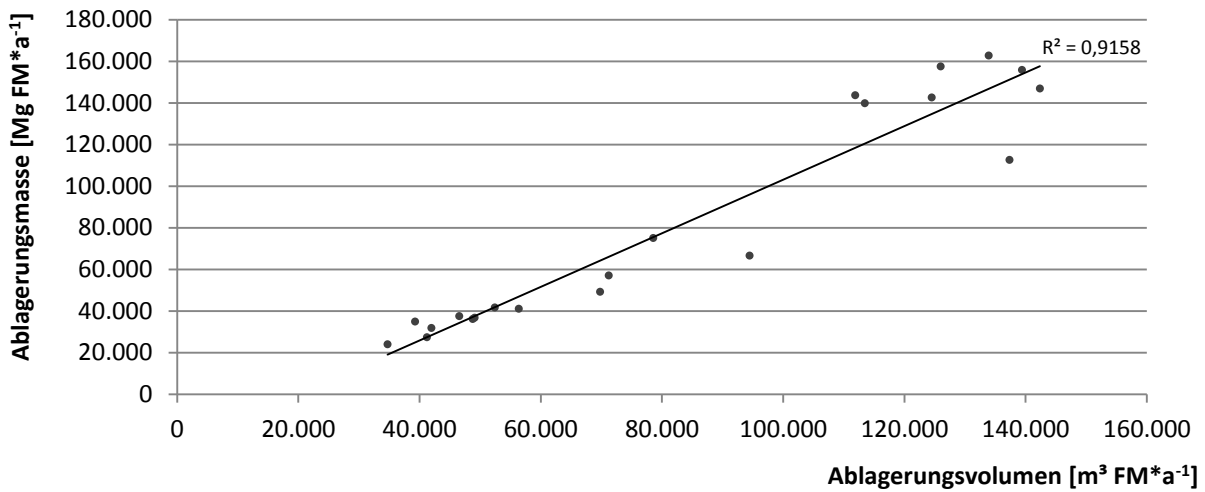


ABBILDUNG 42: ZUSAMMENHANG ZWISCHEN ABLAGERUNGSVOLUMEN UND ABGELAGERTER ABFALLMENGE AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

Zusätzlich lässt diese Darstellung die Ableitung jahresspezifischer Ablagerungsdichten zu. Diese werden aus Abbildung 43 deutlich. Im Mittel ergibt sich, dass 1 m³ Deponievolumen ca. 1,16 Mg FM Abfall beinhaltet, wobei die Ablagerungsdichte durch einen stetig ansteigenden Verlauf geprägt ist.

Unter Berücksichtigung des vom ZOLLERNALBKREIS [2010] angegebenen Gesamtablagerungsvolumens ergeben sich hieraus ca. 2,4 Mio. Mg FM abgelagerte Abfälle, die sich mit der modellierten mittleren Ablagerungsmenge decken.

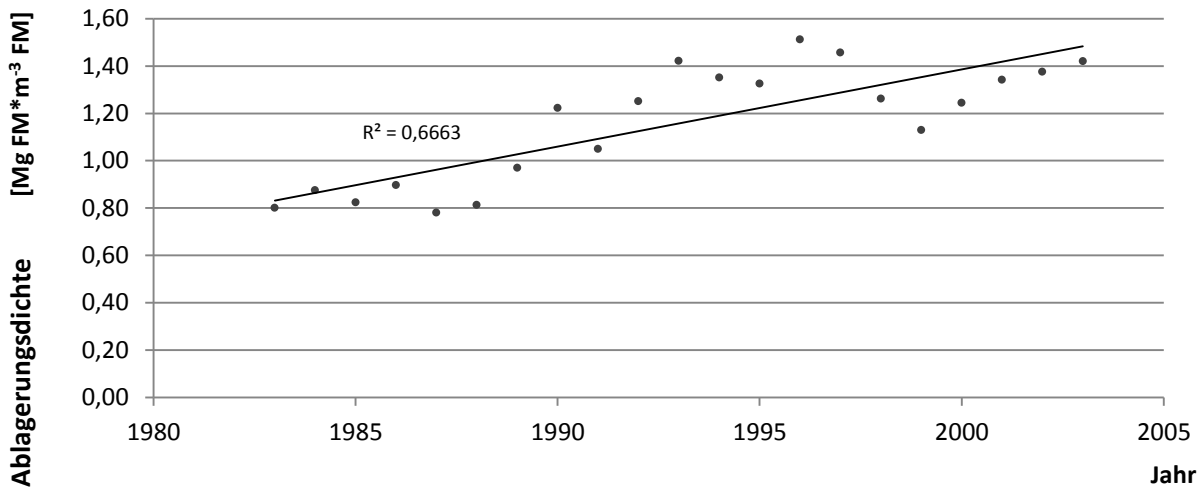


ABBILDUNG 43: ABGELEITETE DICHTEN DER EINGELAGERTEN ABFÄLLE AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

5.1.4 DIGITALE HÖHENMODELLE

Die Auswertung der digitalisierten und georeferenzierten Vermessungspläne wird aus den Darstellungen der Anhänge 14 bis 22 ersichtlich. Hierbei ist jeweils die Höhenänderung zum nächst verfügbaren Aufzeichnungszustand angegeben. Zu berücksichtigen ist, dass negative Höhenunterschiede aus Setzungserscheinungen und Baumaßnahmen resultieren.

In den Jahren 1982 bis 1985 konzentriert sich die Ablagerung von Abfällen vorwiegend auf den südöstlichen Bereich des Deponiekörpers. Es werden in dieser Phase Ablagerungsmächtigkeiten von ca. 2 bis teilweise 12 m erreicht.

In der folgenden Phase (1985 bis 1987) verlagert sich die Hauptablagerungsfläche weiter Richtung Norden. Auch in diesem Zeitraum werden Schichtmächtigkeiten von bis zu etwa 12 m erreicht.

Das sich anschließende Jahr 1988 zeigt erstmals negative Ablagerungsmächtigkeiten im Süden des Deponiekörpers. Diese können vernachlässigt werden und sind dadurch zu erklären, dass dieser Deponiebereich 1988 erstmals vermessen wurde. Wie zu erkennen ist, wandert die Ablagerungsfläche kontinuierlich Richtung Norden fort. Aufgrund der verkürzten Zeitspanne beider Aufnahmen werden maximale Mächtigkeiten von ca. 6 m erreicht. Die Auffüllungen am geschaffenen Südhang betragen hingegen etwa 1 bis 2 m.

In den erfassten Phasen 1988 bis 1989 und 1989 bis 1990 erreicht die Abfallablagerung die nördliche Deponiegrenze. Aufgrund der vergrößerten Ablagerungsfläche sowie des betrachteten Zeitraums sind Ablagerungsschichten von 2 bis 6 m zu verzeichnen, die sich teilweise inselhaft verteilen. Der Südhang zeichnet sich hingegen durch erste Setzungserscheinungen aus.

In der Zeitspanne von 1990 bis 1991 wird erstmals der östliche Bereich des Deponiekörpers mit in die Vermessung aufgenommen. Es zeigt sich, dass dort in diesem Zeitraum Ablagerungen in Höhe von teilweise 8 m stattfanden. Nach Angaben von Deponieleiter REIMANN [2009] handelt es sich bei diesem Deponieabschnitt um einen Monobereich, auf dem vorwiegend inerte Abfälle wie Bodenaushub und Bauschutt abgelagert wurden. Die eigentliche Ablagerungsfläche für Siedlungsabfälle liegt weiterhin im Bereich der heutigen Müllumladestation (MUST II).

Ein ähnliches Bild ergibt sich in für die folgende Zeitspanne, jedoch sind aufgrund des längeren Betrachtungszeitraums die Ablagerungsmächtigkeiten deutlich höher.

Von 1995 bis 2003 konzentriert sich die Ablagerung von Abfällen weiterhin auf den nördlichen bis nordnordöstlichen Bereich der Kreismülldeponie Hechingen. Die bereits verfüllten und abgedeckten südlichen und südwestlichen Hangbereiche zeigen entsprechende Setzungen auf.

Im letzten Betrachtungszeitraum können nahezu über den gesamten Deponiekörper Auffüllungen registriert werden. Diese ergeben sich letztlich aus der notwendigen Profilierung des Deponiekörpers. Starke Höhenunterschiede werden in diesem Zusammenhang vor allem im südöstlichen Deponiebereich deutlich. Ursächlich hierfür ist die Errichtung der Basisdichtung des Auffüllabschnitts II.

Insgesamt ergibt sich somit, dass der Aufbau des Deponiekörpers der Kreismülldeponie Hechingen kontinuierlich entlang des ehemals vorhandenen Hangs gewachsen ist. Die Ablagerung der Abfälle erfolgte dabei in Schichten, deren Mächtigkeit im Wesentlichen von der jeweils zur Verfügung stehenden Fläche abhing.

Die tiefenabhängige Untersuchung des Deponieguts ermöglicht es in Verbindung mit den digitalen Höhenmodellen und zeitspezifischen Fundstücken Angaben zum Alter des betrachteten Deponiebereichs zu machen. Hierzu zeigt Anhang 23 bis 31 die jeweils erfassten Tiefenbereiche und deren Ablagerungszeitraum.

Eine Zusammenfassung des abgeleiteten Alters der einzelnen Deponiegutchargen gibt Tabelle 27.

TABELLE 27: ZUSAMMENFASSENDE DARSTELLUNG ZUR ZUORDNUNG DER DEPONIEGUTCHARGEN ZUM ABLAGERUNGSJAHR

Chargenkennung	Jahr der Ablagerung														
	1985	1986	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2003	2004
BI/1/1													x		
BI/1/2															
BI/1/3											x				
BI/2/1											x				
BI/2/2										x					
BI/3/1										x					
BI/3/2									x						
BI/3/3								x							
BI/3/4							x								
BI/3/5						x									
BI/3/6					x										
BI/4/1								x							
BI/4/2							x								
BI/4/3						x									
BI/4/4					x										
BI/4/5				x											
BI/5/1					x										
BI/5/2				x											
BI/5/3			x												
BI/6/1		x													
BI/6/2	x														
BII/1/1															x
BII/1/2															x
BII/1/3													x		
BII/1/4									x						
BII/1/5								x							
BII/1/6								x							
BII/1/7						x									
BII/1/8					x										
BII/1/9				x											
BII/1/10			x												
BII/2/1	x														
BII/3/1								x							
BII/3/2			x												
BII/3/3	x														
Gesamt	3	1	3	3	4	3	2	5	2	2	2	1	1	1	2

Ausgehend vom schichtweisen Aufbau des Deponiekörpers der Kreismülldeponie Hechingen ist zu vermuten, dass zwischen der untersuchten Höhe über NN und dem spezifischen Ablagerungsjahr ein funktionaler Zusammenhang besteht. Wie Abbildung 44 zu entnehmen ist, kann das Ablagerungsjahr einzelner Deponiebereiche nach Formel 17 abgeleitet werden. Der statistische Zusammenhang ist hierbei mit $R^2 = 75\%$ als gut einzustufen.

FORMEL 17: ABLEITUNG DES ABLAGERUNGSJAHRES UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER ABLAGERUNGSHÖHE ÜBER NN

$$Ablagerungsjahr = 0,38 * H_{üNN} + 1771$$

mit:

$H_{üNN}$: Höhe über NN [m]

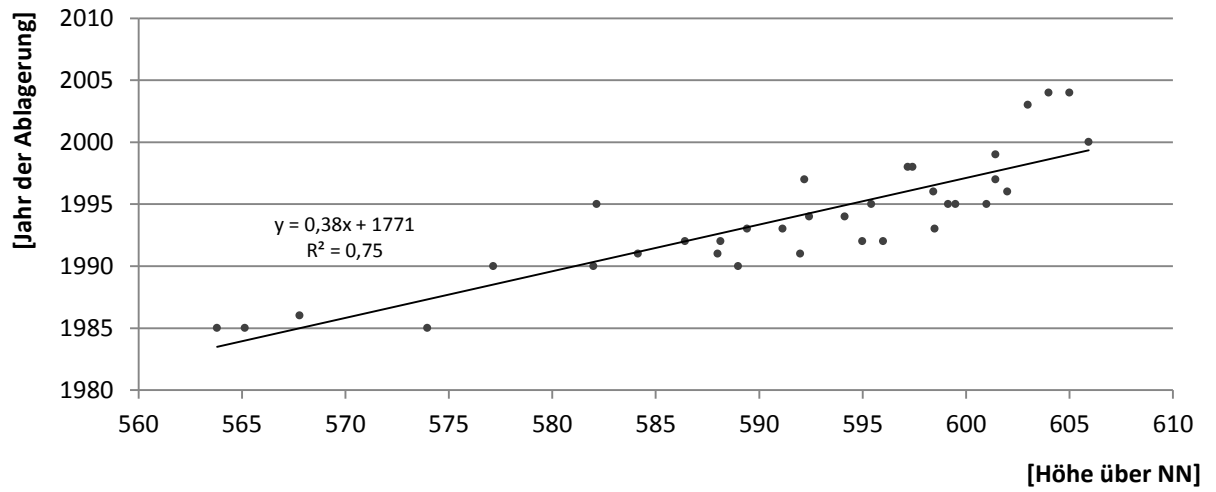


ABBILDUNG 44: ZUSAMMENHANG ZWISCHEN HÖHE DER UNTERSUCHUNG ÜBER NN UND DEM ALTER DES DEPONIEGUTS DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

5.2 RESSOURCENPOTENZIALERMITTLUNG

5.2.1 PHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN

5.2.1.1 KORNGRÖßENVERTEILUNG

Die Untersuchungen zur Korngrößenverteilung der Bohrstaffeln I und II zeigen in Bezug auf die mittleren Anteile keine signifikanten Abweichungen zueinander. Auffällig ist jedoch, dass das $Kl_{95\%}$ für die Bohrstaffel II einen deutlich breiteren Wertebereich abdeckt und tendenziell höhere Feianteile vermuten lässt. Diese Tatsache kann einerseits dadurch erklärt werden, dass im Rahmen der Bohrstaffel II aufgrund des geringeren Bohrdurchmessers eine stärkere Zerkleinerung des Deponieguts stattgefunden hat und es sich andererseits bei den Deponiegutchargen BII/3/1 sowie BII/3/2 um vorzerkleinerten Bauschutt handelte.

Insgesamt zeigt sich, dass bei einem Rückbau der Kreismülldeponie Hechingen mit einem mittleren Anteil der Fraktion < 35 mm von ca. 65 Gew.-% der FM zu rechnen ist. Entsprechend liegt die Fraktion > 35 mm im Wertebereich von ca. 35 Gew.-% der FM (siehe Abbildung 45 und Anhang 32). Diese Ergebnisse decken sich mit Untersuchungen von EHRIG ET AL. [1998], die für westdeutsche Deponien einen mittleren Anteil der Fraktion < 35 mm von ca. 60 Gew.-% der FM aufweisen.

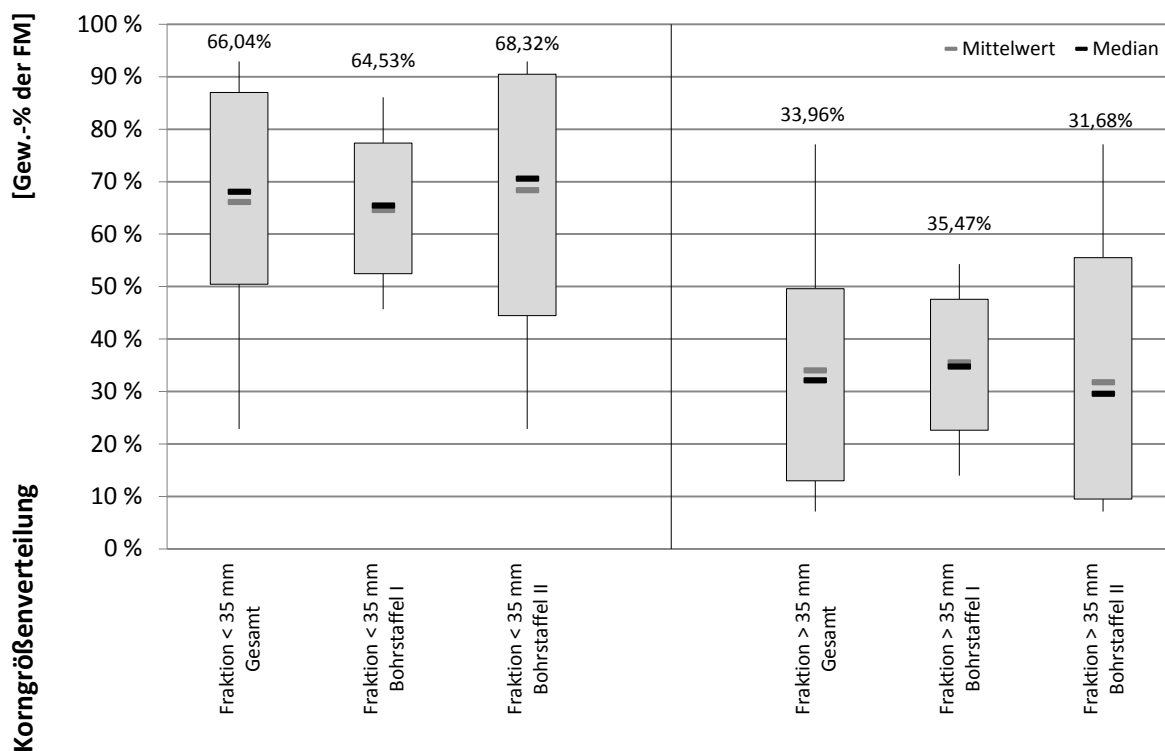


ABBILDUNG 45: MITTLERE KORNGRÖßENVERTEILUNG DER BOHRSTAFFEL I UND II SOWIE INSGESAMT UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER FM

Neben der in-situ stattgefundenen Klassierung konnte im Nachgang eine weitere Differenzierung der Fraktion < 35 mm realisiert werden. Hierzu war es jedoch notwendig, die einzelnen

Deponiegutchargen zu trocknen, sodass sich die in Abbildung 46 und Anhang 33 dargestellten Ergebnisse nun auf die TM beziehen. Ein direkter Vergleich zu den vorherigen Abbildungen ist somit nicht möglich.

Der mittlere Anteil der Fraktion < 5 mm kann mit ca. 25 Gew.-% der TM angegeben werden. Hierbei zeichnet sich Bohrstaffel I durch einen vergleichsweise höheren Schwankungsbereich dieser Fraktion aus. Die Fraktion 5 – 35 mm liegt zu etwa 40 Gew.-% TM vor. Die mittleren Abweichungen der Bohrstaffeln I und II können in diesem Zusammenhang als geringfügig eingestuft werden. Ähnlich den vorherigen Ergebnissen macht der Anteil der Fraktion > 35 mm ca. 32 – 40 Gew.-% der TM aus (Abbildung 46 und Anhang 33).

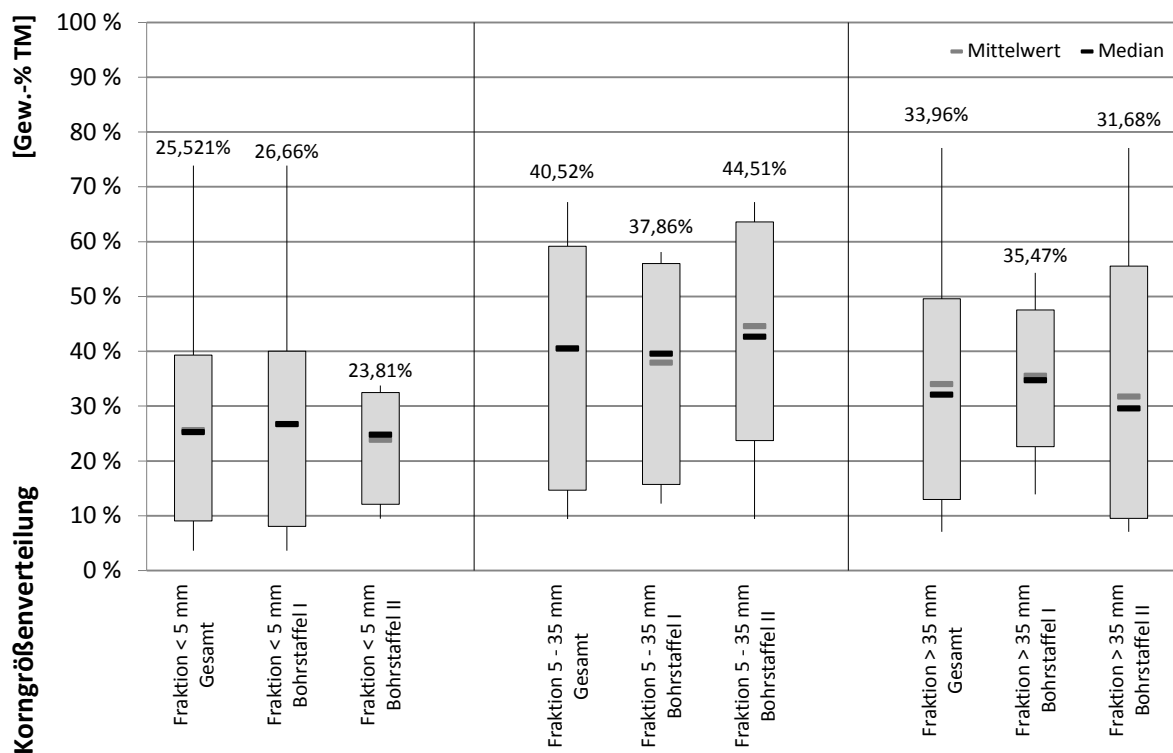


ABBILDUNG 46: MITTLERE KORNGRÖßENVERTEILUNG DER BOHRSTAFFEL I UND II SOWIE INSGESAMT UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER TM

Biochemische Abbauprozesse innerhalb des Deponiekörpers sowie die Tatsache, dass ältere Abfälle einen höheren Feinanteil aufwiesen, lassen vermuten, dass zwischen Ablagerungszeitpunkt und Korngrößenverteilung ein Zusammenhang besteht.

Tendenziell lassen Abbildung 47 und Anhang 34 in diesem Zusammenhang einen zeitspezifischen Trend erkennen. Mit zunehmendem Alter des Deponieguts nimmt der Feinanteil ab und im Gegenzug steigt der Grobanteil entsprechend an.

Als eine Ursache hierfür kann angesehen werden, dass leicht wasserlösliche, anorganische sowie organische Substanzen und Abbauprodukte über das Sickerwasser aus dem Deponiekörper eluiert werden. Der Einfluss des erhöhten Feinanteils älterer Abfälle kann in diesem Fall nicht näher charakterisiert werden.

Zudem ist zu berücksichtigen, dass gegen Ende der Ablagerung vorwiegend inerte und feinkörnige Materialien wie bspw. Bodenaushub zur Profilierung des Deponiekörpers abgelagert wurden. Diese besitzen aus technischen Gründen einen hohen Feinanteil, was den aufgezeigten Anstieg des Feinanteils gegen Ende der Ablagerung erklären könnte.

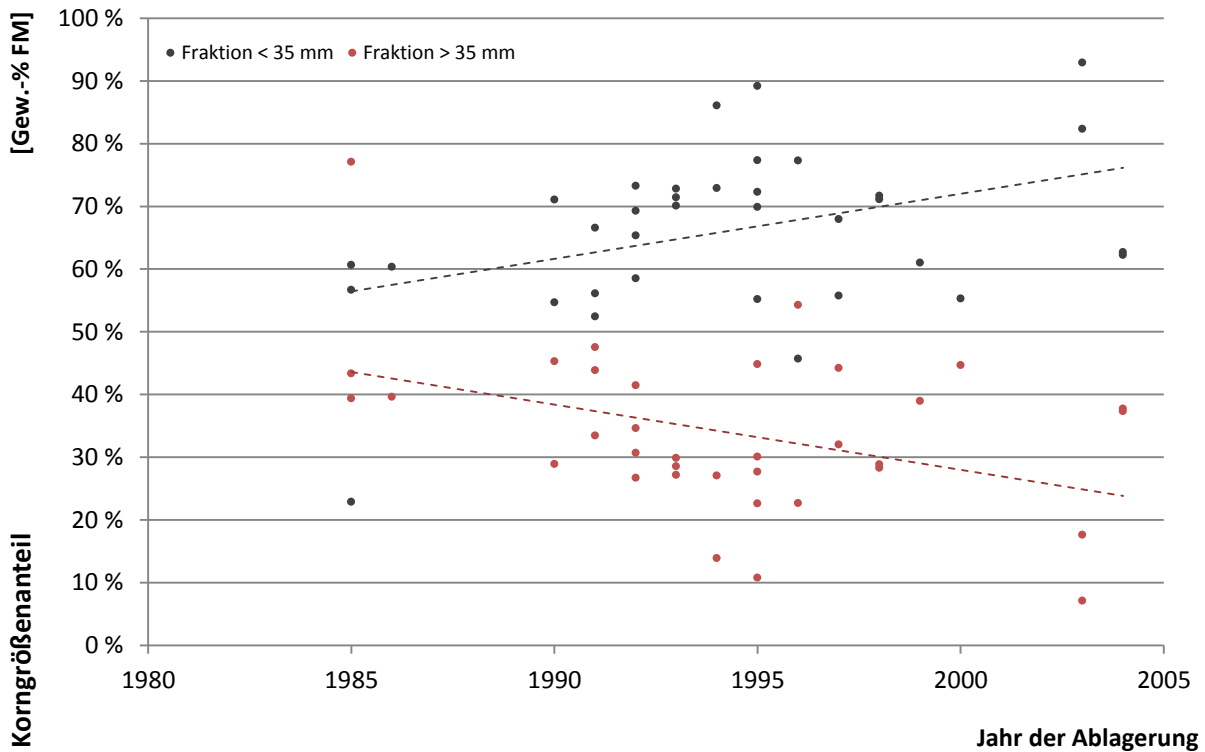


ABBILDUNG 47: KORNGRÖßENANTEILE DER FRAKTIONEN < 35 MM UND > 35 MM IN ABHÄNGIGKEIT DES ABLAGERUNGSAALTERS

Die aufgezeigten zeitlichen Zusammenhänge der Korngrößenverteilung spiegeln sich auch bei der räumlichen Betrachtung der Korngrößenanteile wider. Hierbei zeigen die Abbildungen 48 bis 49 und der Anhang 35 bis 37, dass in älteren Deponiebereichen, welche sich im Westen und Südwesten des Deponiekörpers finden, im Mittel ein vergleichsweise hoher Anteil der Fraktion > 35 mm auftritt. Im Gegenzug sind der nördliche und nordöstliche Bereich sowie Bereiche der Deponiekuppe durch höhere Anteile der Fraktion < 35 mm bzw. < 5 mm und 5 – 35 mm geprägt.

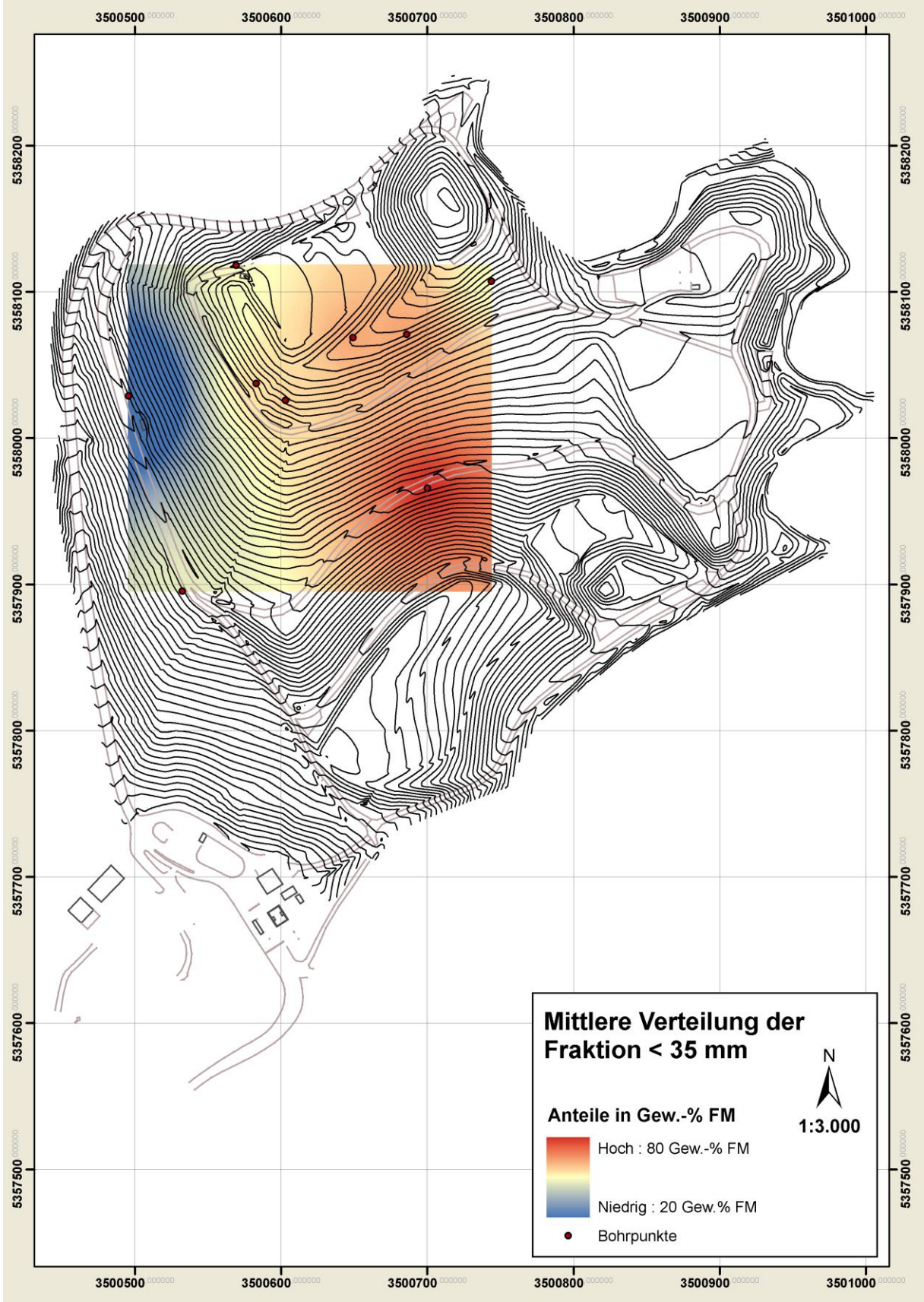


ABBILDUNG 48: RÄUMLICHE VERTEILUNG DER MITTLEREN KORNGRÖßENANTEILE DER FRAKTION < 35 mm UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER FM

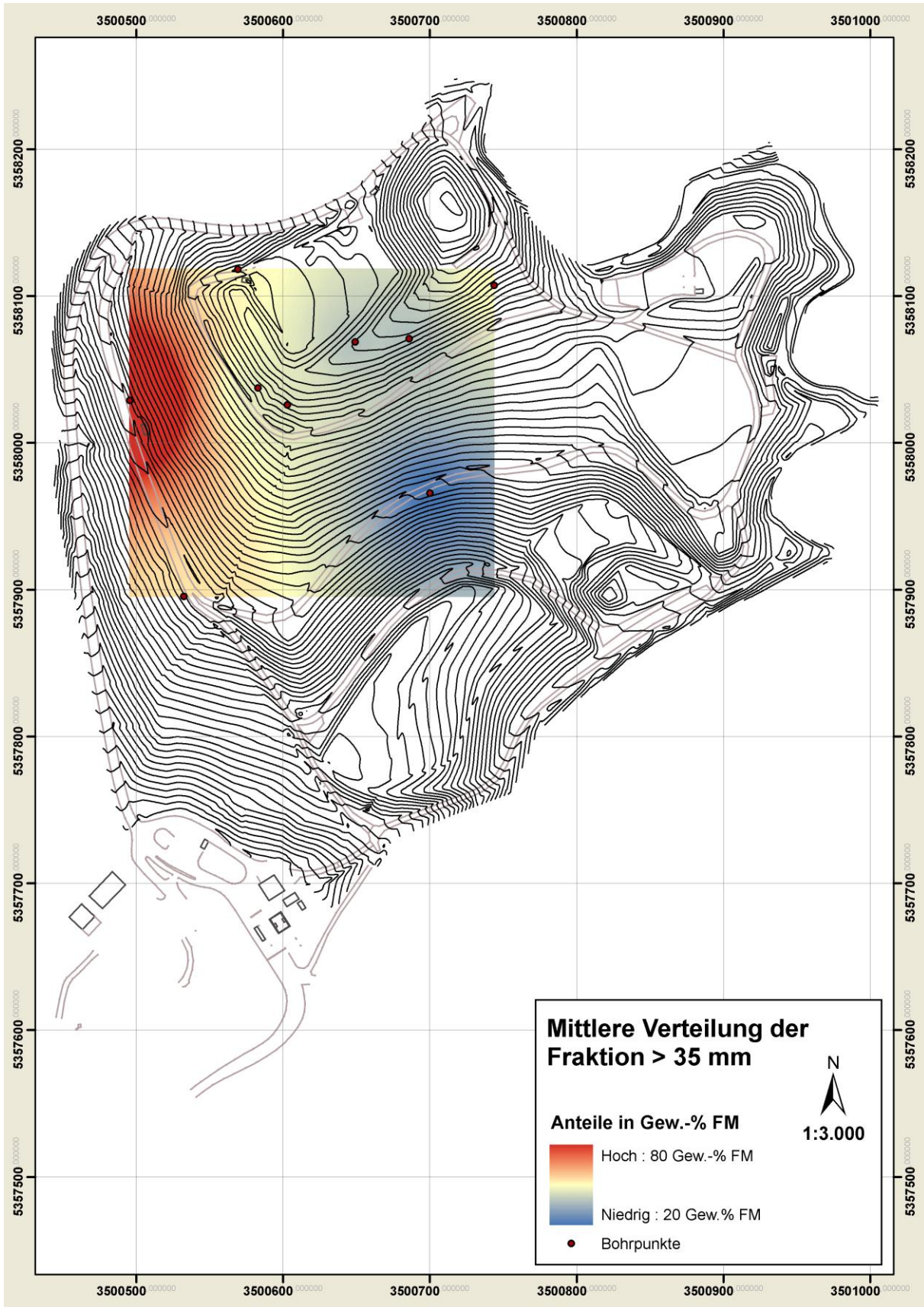


ABBILDUNG 49: RÄUMLICHE VERTEILUNG DER MITTLEREN KORNGRÖßENANTEILE DER FRAKTION > 35 MM UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER FM

5.2.1.2 WASSERGEHALT

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

Insgesamt zeigt sich anhand der Abbildung 50, dass der mittlere Wassergehalt der Fraktion < 35 mm ca. 43 Gew.-% der FM ausmacht. Für die Grobfraktion liegt er mit ca. 35 Gew.-% der FM vergleichsweise niedrig. Dieses grundsätzliche Bild spiegelt sich auch in den dargestellten deskriptiven Merkmalen wider. So erstreckt sich das $KI_{95\%}$ der Feinfraktion von 23 bis 55 % der FM, hingegen das der Grobfraktion von lediglich 13 bis 51 Gew.-% der FM.

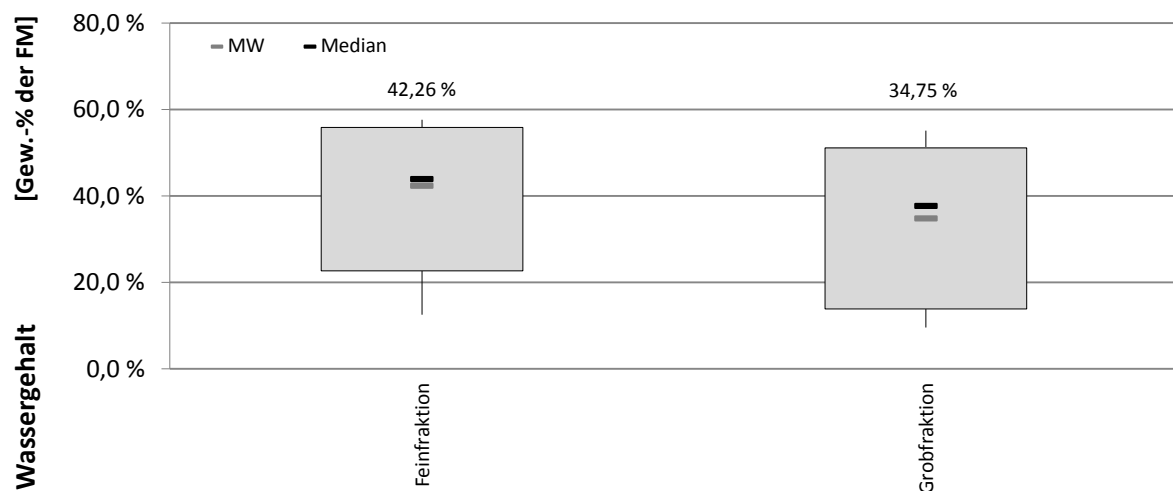


ABBILDUNG 50: WASSERGEHALTE DER FEIN- UND GROBFRAKTION DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

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

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

LAGESPEZIFISCH

Wie die Abbildungen 51 und 52 verdeutlichen, existiert insgesamt kein statistisch abgesicherter Zusammenhang zwischen der Untersuchungstiefe und dem dort vorgefundenen Wassergehalt. Dennoch zeigen die vorhandenen linearen Trendfunktionen einen negativen Trend auf. Dies bedeutet, dass mit zunehmender Tiefe eine Erhöhung des Wassergehalts zu vermuten ist.

Klare Zusammenhänge existieren jedoch bei der Gegenüberstellung des Wassergehalts der Grob- und Feinfraktion (Abbildung 53).

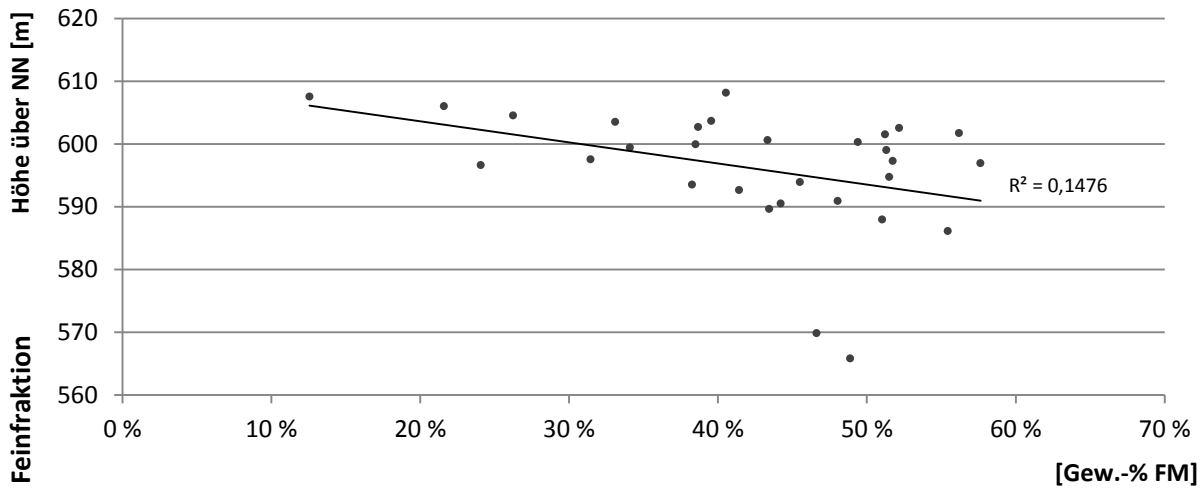


ABBILDUNG 51: ZUSAMMENHANG ZWISCHEN WASSERGEHALT UND UNTERSUCHTER TIEFENREGION | FEINFRAKTION DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

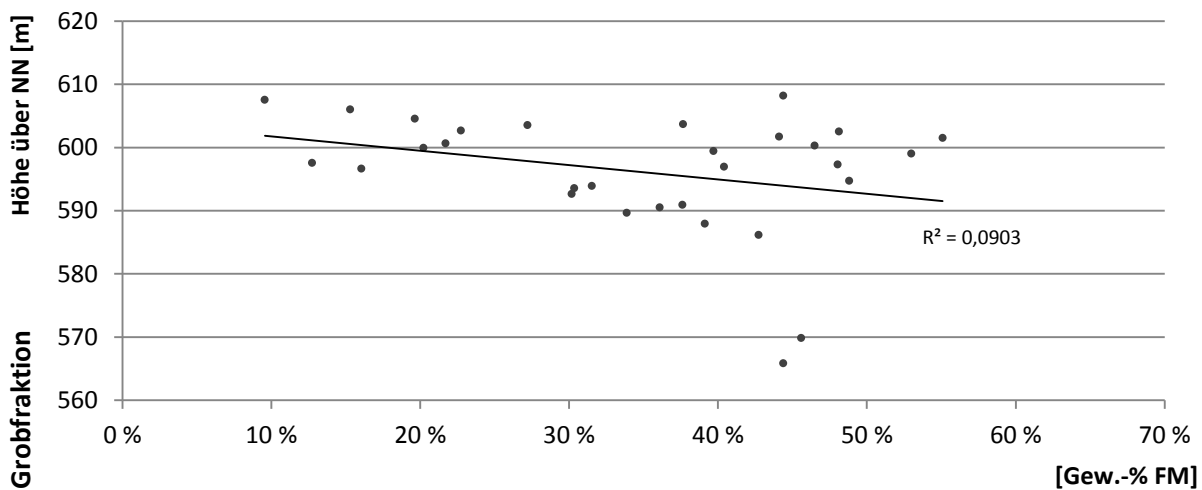


ABBILDUNG 52: ZUSAMMENHANG ZWISCHEN WASSERGEHALT UND UNTERSUCHTER TIEFENREGION | GROBFRAKTION DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

Hierbei ergibt sich aus der angegebenen Geradengleichung, dass die Grobfraktion etwa 4 Gew.-% geringere Wassergehalte aufweist als die Feinfraktion. Ein R^2 von ca. 70 % bestätigt den guten linearen Zusammenhang dieser beiden Kenngrößen, der wie folgt charakterisiert werden kann:

FORMEL 18: FUNKTIONALER ZUSAMMENHANG DES WASSERGEHALTS DER FRAKTIONEN < UND > 35 MM DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

$$\text{Wassergehalt}_{>35\text{ mm}} = 0,97 * \text{Wassergehalt}_{<35\text{ mm}} - 6,1 \text{ [Gew.-% TM]}$$

Mit:

$\text{Wassergehalt}_{>35\text{ mm}}$: Wassergehalt der Fraktion > 35 mm [Gew.-% TM]

$\text{Wassergehalt}_{<35\text{ mm}}$: Wassergehalt der Fraktion < 35 mm [Gew.-% TM]

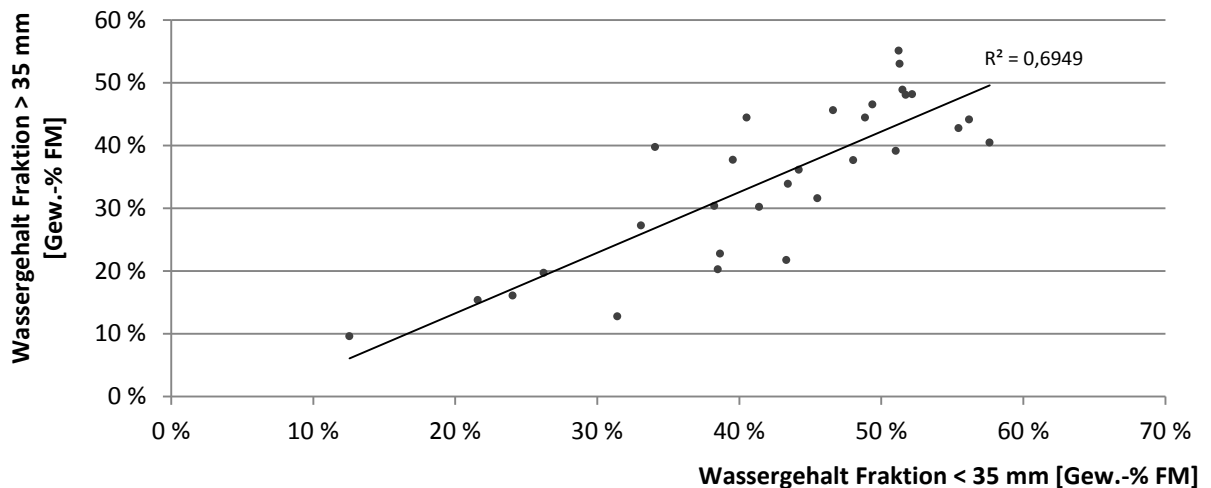


ABBILDUNG 53: ZUSAMMENHANG DES WASSERGEHALTS DER GROB- UND FEINFRAKTION DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

Anhang 38 bis 46 stellt den bohrlochspezifischen Tiefenverlauf des Wassergehaltes dar. Es zeigt sich, dass die Bohrlöcher BI/3, BI/4, BI/5 und BII/1 sowohl für die Fein- als auch für die Grobfraktion eine Zunahme des Wassergehaltes mit zunehmender Tiefe besitzen.

Die übrigen Bohrlöcher beschreiben hingegen ein diffuses Bild, das keine Tiefentendenz des Wassergehaltes erkennen lässt. Auffällig ist in diesem Zusammenhang, dass hierbei zudem ein gegenläufiger Trend der Grob- und Feinfraktion existiert.

Die zusammenfassenden Abbildungen des Anhangs (45 und 46) verdeutlichen abschließend die diffusen Wassergehaltsschwankungen innerhalb der untersuchten Deponiebereiche.

Der nicht eindeutige Zusammenhang zwischen Tiefe und Wassergehalt lässt darauf schließen, dass innerhalb des Deponiekörpers wasserstauende und wasserführende Schichten existieren. Bekräftigt wird diese Annahme durch die Tatsache, dass die Abfallablagerung auf der Kreismülldeponie Hechingen flächenhaft also in Schichten stattgefunden hat.

Für den großtechnischen Deponierückbau gilt es daher geeignete Stabilisierungsverfahren zu finden, die als Nebeneffekt eine starke Austrocknung des behandelten Bereichs hervorrufen. Hierdurch wird in Bezug auf den Wassergehalt eine Homogenisierung erreicht, wodurch nachgeschaltete Aufbereitungsarbeiten effizienter ablaufen können.

RÄUMLICH

Räumlich gesehen, zeigen sich die mittleren bohrlochspezifischen Wassergehalte, wie in Abbildung 54 und Abbildung 55 dargestellt. Hierbei ist besonders zu berücksichtigen, dass ausschließlich die mittleren Gehalte aufgezeigt werden, innerhalb derer jedoch starke Schwankungen existieren können.

Für die Grobfraction (> 35 mm) zeigen sich im Rahmen der Untersuchungen Hotspots im Bereich der Deponiekuppe und im südwestlichen sowie nordnordöstlichen Bereich des Deponiekörpers. Hier werden punktuell mittlere Wassergehalte von bis zu 46 Gew.-% der FM erreicht. Mit 26 bis 34 Gew.-% FM zeigen hingegen die nordwestlichen Bereiche des Deponiegeländes die geringsten Wassergehalte auf.

Aufgrund der aufgezeigten Korrelation der Wassergehalte der Fraktionen $>$ und $<$ 35 mm liegen auch bei Betrachtung der Fraktion $<$ 35 mm die höchsten Gehalte im südwestlichen und nordnordöstlichen Bereich der betrachteten Deponiefläche. Vergleichsweise trockene Deponieabschnitte finden sich wiederum im nordwestlichen Deponieabschnitt.

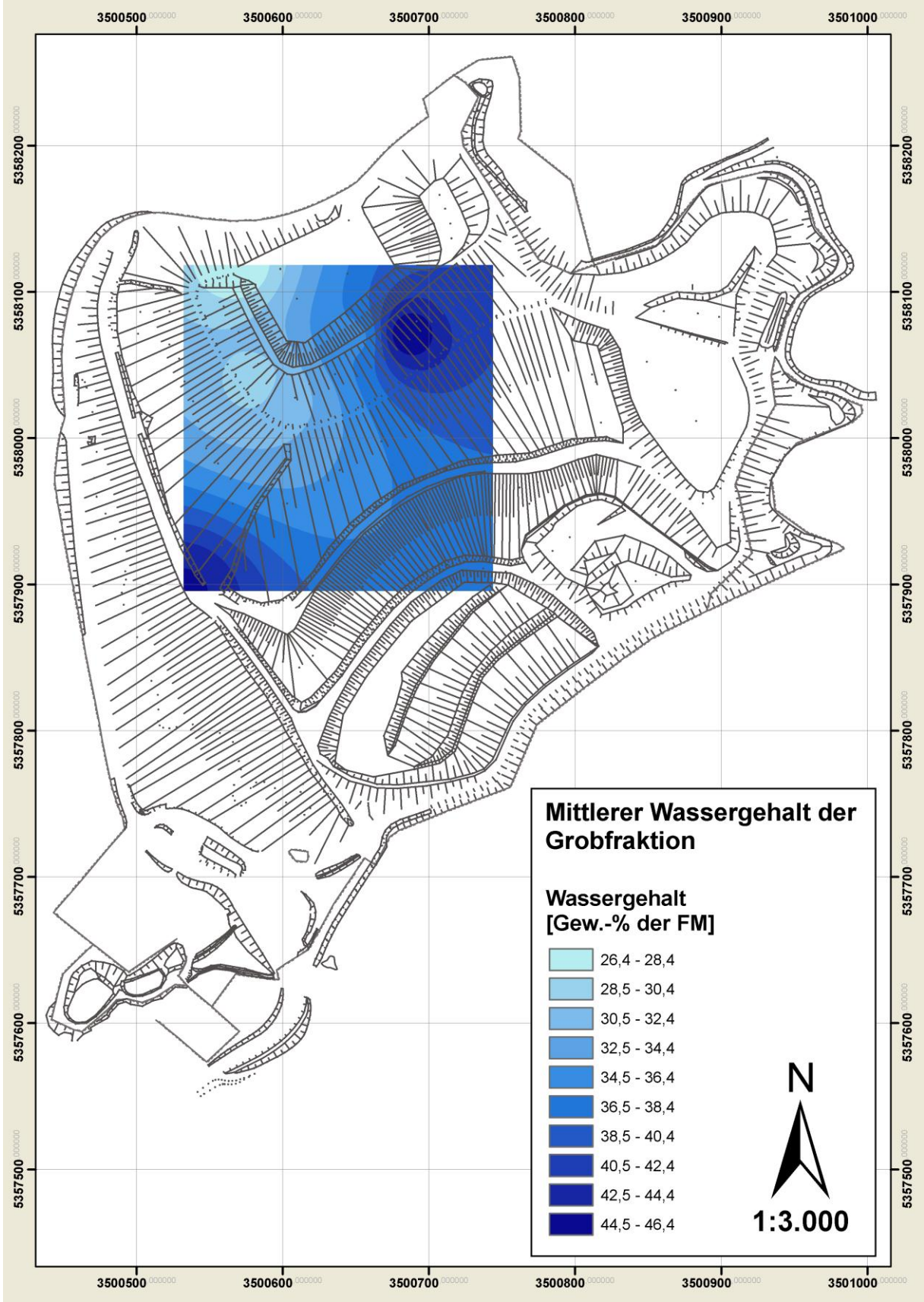


ABBILDUNG 54: MITTLERER WASSERGEHALT DER GROBFRAKTION DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

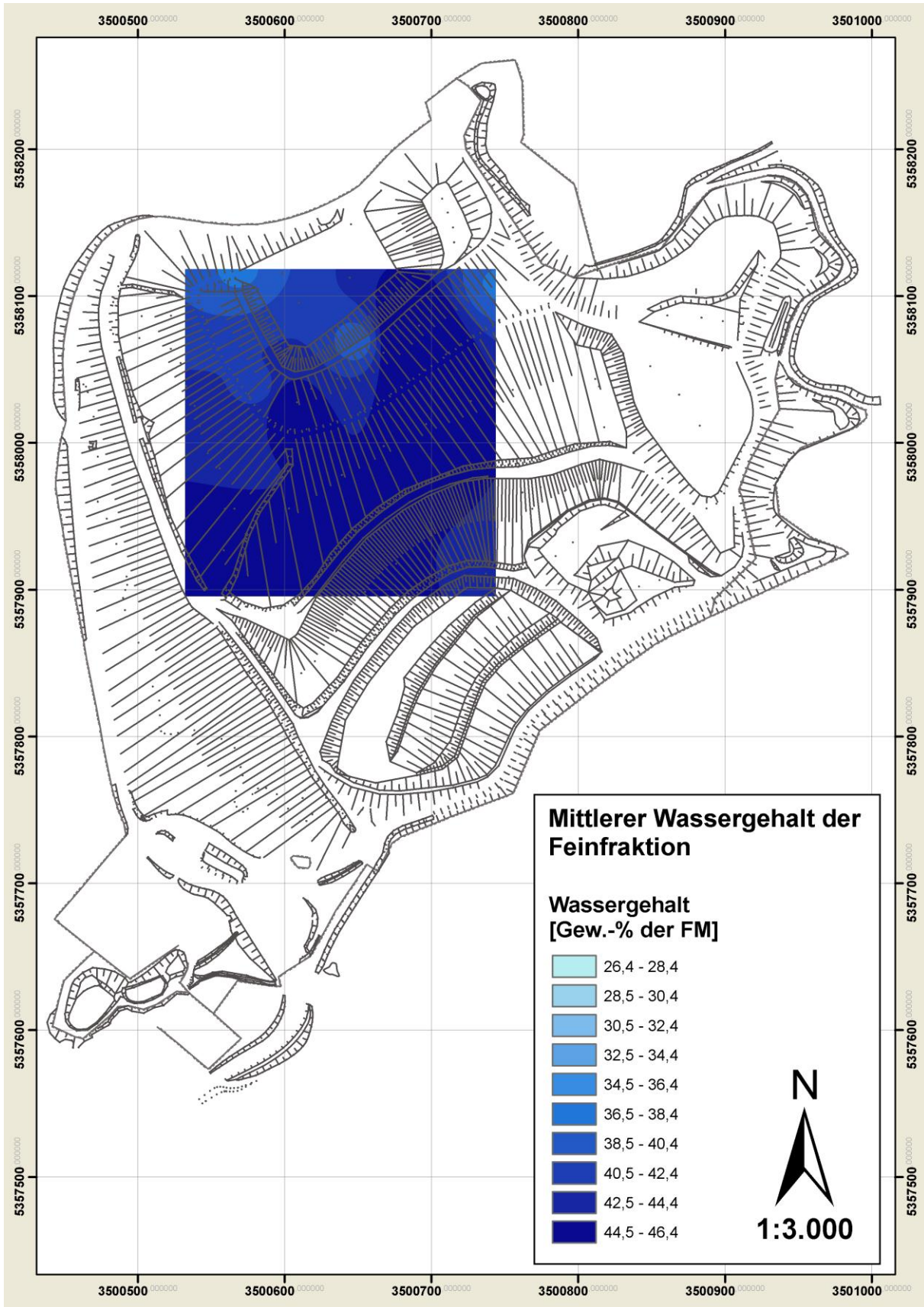


ABBILDUNG 55: MITTLERER WASSERGEHALT DER FEINFRAKTION DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

STOFFSPEZIFISCH

Die mittleren stoffspezifischen Wassergehalte sind Abbildung 56 zu entnehmen. Es wird ersichtlich, dass Stoffe wie bspw. Glas oder Metalle aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften einen deutlich geringeren Wasseranteil besitzen als saugfähige Materialien wie bspw. PPK. Für Textilien, Stoffe ang. (anderweitig nicht aufgeführt), Holz und PPK liegt der Wassergehalt in einem Bereich von 50 - 60 Gew.-% der FM. Sortierreste weisen mit einem Wassergehalt von ca. 40 Gew.-% der FM ebenfalls einen vergleichsweise hohen Wert auf.

Für Kunststoffe und Mineralstoffe kann ein mittlerer Wassergehalt von 10 Gew.-% der FM angenommen werden. Im Fall der Kunststoffe, die im Normalfall kein Wasserspeichervermögen besitzen, ist dieser Wert durch das Verhältnis von Oberfläche zu Materialgewicht zu erklären. So besitzen bspw. Kunststofffolien ein geringes Eigengewicht bei gleichzeitig großer Oberfläche, an der entsprechend große Mengen Wasser haften können.

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

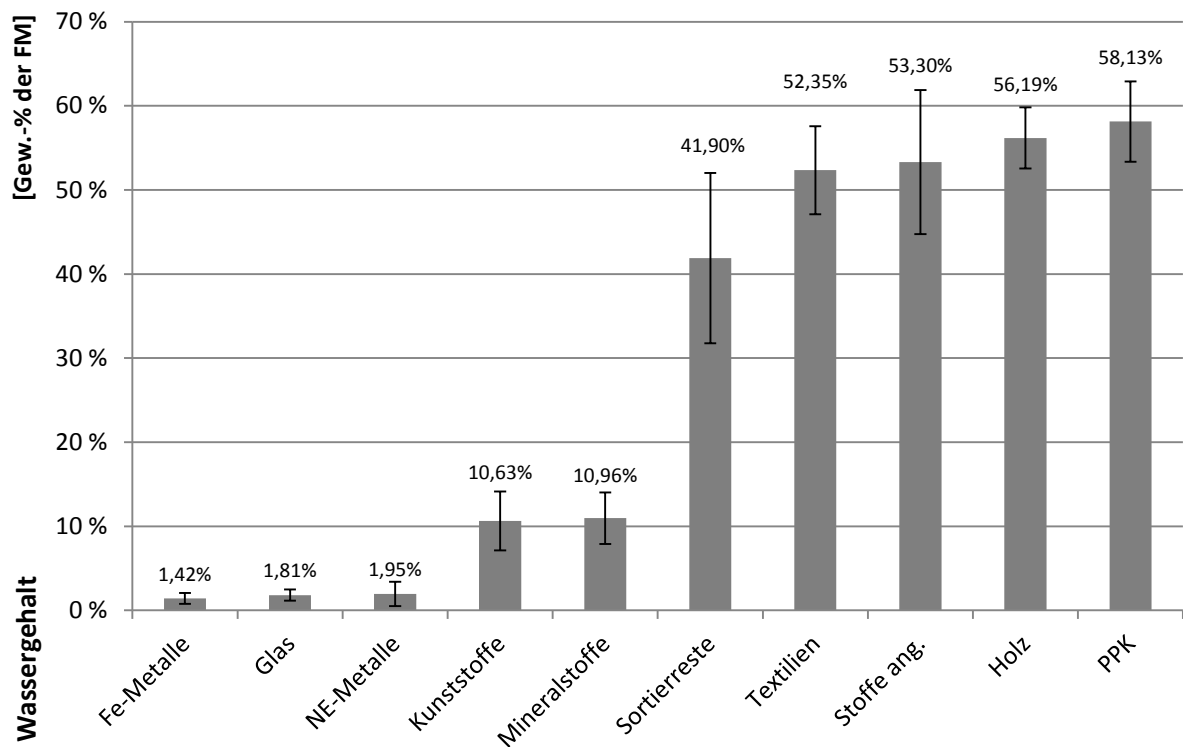


ABBILDUNG 56: MITTLERER STOFFSPEZIFISCHER WASSERGEHALT DES DEPONIEGUTS DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

5.2.1.3 GLÜHVERLUST

Der durchschnittliche Glühverlust des gesamten untersuchten Materials liegt bei ca. 41 Gew.-% TM. Beim Vergleich von Grob- und Feinfraktion je Deponiegutcharge fällt auf, dass die Grobfraktion stets einen höheren Glühverlust aufweist als die Feinfraktion (im Mittel 50 Gew.-% TM bei der Grobfraktion gegenüber 32 Gew.-% TM bei der Feinfraktion). Da sich der Großteil der biologisch abbaubaren organischen Stoffe in der Feinfraktion findet, ist der weitaus höhere Glühverlust der Grobfraktion mit dem höheren Anteil an kohlenstoffreichen, biologisch nicht abbaubaren Stoffen wie bspw. Kunststoffe zu erklären. Zudem besitzt die Feinfraktion einen vergleichsweise hohen Anteil an mineralischen Bestandteilen, die einen geringen Glühverlust aufweisen.

Der vergleichsweise hohe Glühverlust der Feinfraktion, der in der Literatur im Wertebereich von 17 bis 26 Gew.-% TM für 10 bis 15 Jahre alte Abfälle schwankt, deutet darauf hin, dass diese Fraktion noch ein hohes Potenzial an leicht abbaubaren organischen Verbindungen besitzt. Ursächlich könnten auch biologisch nicht oder nur schwer abbaubare kohlenstoffreiche Materialien sein, deren Anteil jedoch deutlich geringer ist als in der Grobfraktion.

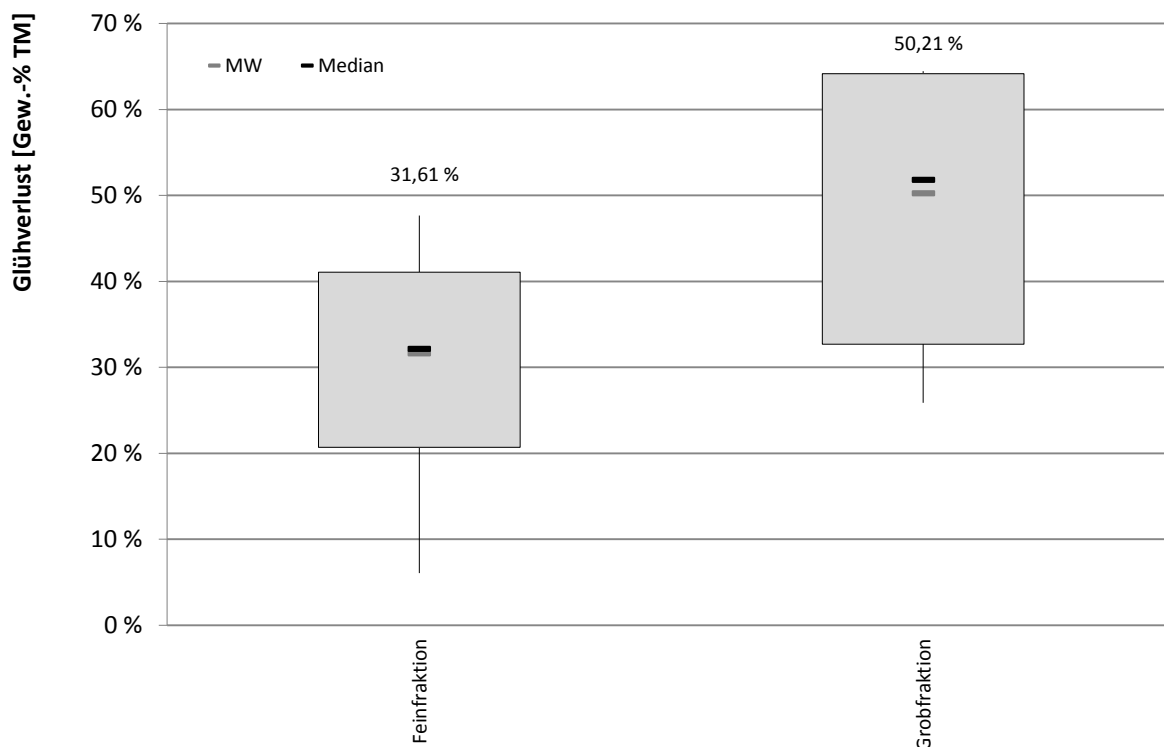


ABBILDUNG 57: GLÜHVERLUST DER FEIN- UND GROBFRAKTION DES DEPONIEGUTS DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

LAGESPEZIFISCH

Die Abbildungen 58 und 59 stellen die ermittelten Glühverluste der Fein- und Grobfraktion in Abhängigkeit der Untersuchungstiefe dar. Wie bereits im Fall des Wassergehalts sind keine statistisch abgesicherten Zusammenhänge feststellbar.

Tendenziell zeigen beide Geraden, dass mit zunehmender Höhe über NN, höhere Glühverlustgehalte zu erwarten sind.

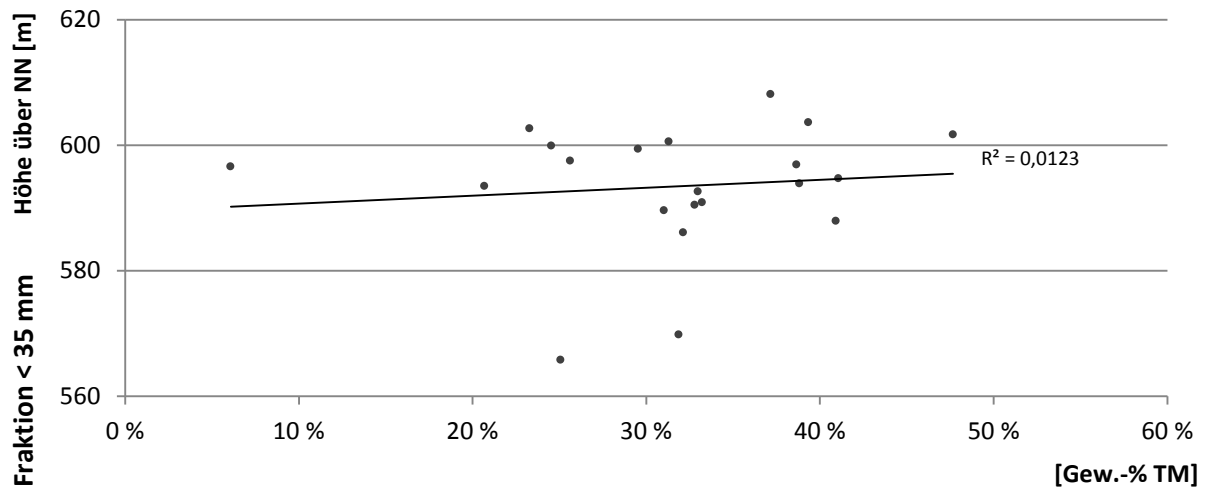


ABBILDUNG 58: ZUSAMMENHANG ZWISCHEN GLÜHVERLUST UND UNTERSUCHTER TIEFENREGION | FEINFRAKTION DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

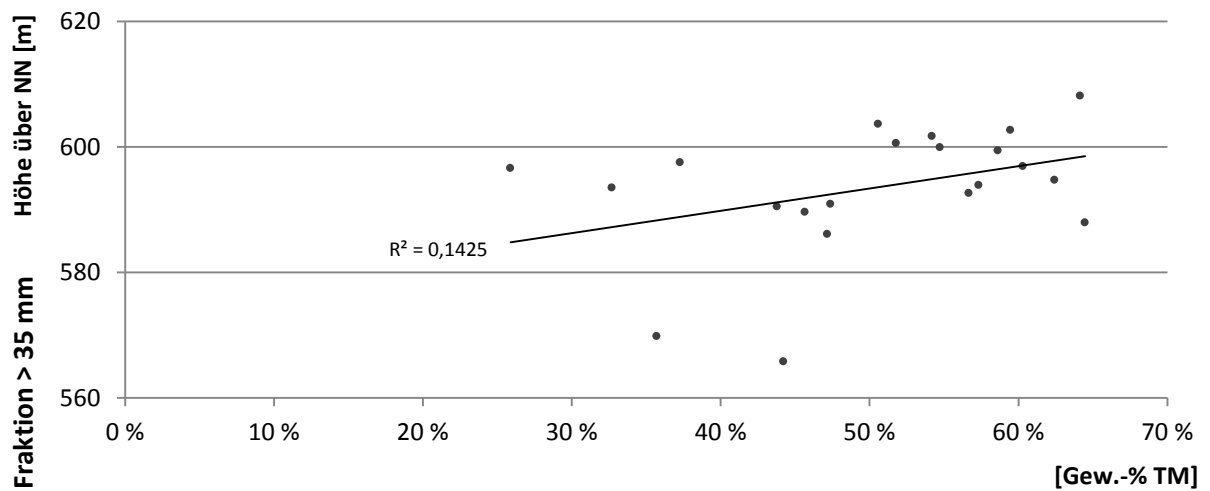


ABBILDUNG 59: ZUSAMMENHANG ZWISCHEN GLÜHVERLUST UND UNTERSUCHTER TIEFENREGION | GROBFRAKTION DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

Einen deutlicheren Zusammenhang, mit $R^2 = 46 \%$, zeigt hingegen die Gegenüberstellung der Glühverluste der Fraktion $<$ und $> 35 \text{ mm}$ (Abbildung 60). Dieser kann über nachfolgende Funktion beschrieben werden:

FORMEL 19: FUNKTIONALER ZUSAMMENHANG DES GLÜHVERLUSTES DER FRAKTIONEN $<$ UND $> 35 \text{ mm}$ DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

$$\text{Glühverlust}_{>35 \text{ mm}} = 0,82 * \text{Glühverlust}_{<35 \text{ mm}} + 24,4 \text{ [Gew.-% TM]}$$

Mit:

$\text{Glühverlust}_{>35 \text{ mm}}$: Glühverlust der Fraktion $> 35 \text{ mm}$ [Gew.-% TM]

$\text{Glühverlust}_{<35 \text{ mm}}$: Glühverlust der Fraktion $< 35 \text{ mm}$ [Gew.-% TM]

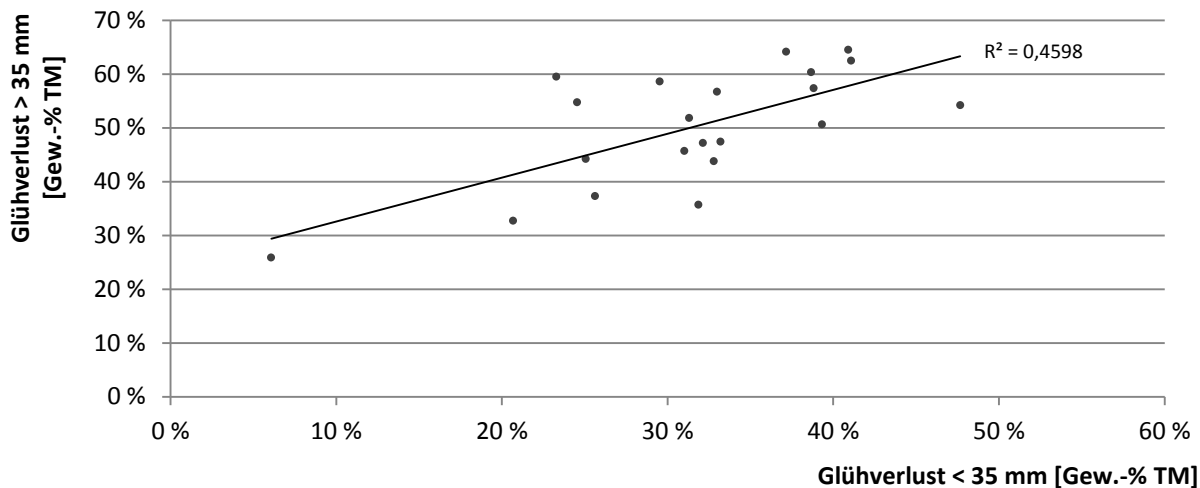


ABBILDUNG 60: ZUSAMMENHANG DES GLÜHVERLUSTES DER FRAKTION < UND > 35 MM DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

Die Anhänge 47 bis 54 zeigen in Anlehnung an die Untersuchungen zum lokalen Wassergehalt die bohrlochspezifischen Tiefenverläufe des Glühverlustes. Tendenziell lassen hierbei die Bohrlöcher BI/3, BI/4 und BI/5 sowohl für die Fein- als auch für die Grobfraction eine Zunahme des Glühverlusts mit zunehmender Tiefe erkennen.

Die übrigen Bohrlöcher zeigen hingegen unterschiedliche Verläufe der Fraktion < und > 35 mm. So nimmt in diesen Fällen der Glühverlust der Fraktion > 35 mm mit zunehmender Tiefe zu und der der Fraktion < 35 mm ab. Auch hier kann von einem gegenläufigen Trend der Fraktion < und > 35 mm gesprochen werden.

RÄUMLICH

Durch Interpolation der bohrlochspezifischen mittleren Glühverluste der Fraktion < und > 35 mm werden räumlich Aspekte der Glühverlustanteile ersichtlich (Abbildung 61 und Abbildung 62). Zu beachten ist, dass aus zeitlichen Gründen ausschließlich für Bohrstaffel I Untersuchungen zum Glühverlust gemacht werden konnten, woraus eine kleinere räumliche Interpolationsfläche resultiert.

Die Grobfraction (> 35 mm) zeigt einen von Westen nach Osten ansteigenden Verlauf des Glühverlustes. Hierbei werden im westlichen Deponiebereich 38 Gew.-% TM erreicht, die nach Osten hin auf Werte von 58 Gew.-% TM ansteigen. Dies entspricht einem Gradienten von ca. 20 Gew.-% TM.

Wie auf Basis der Korrelationsanalyse zu vermuten ist, zeigt auch die Fraktion < 35 mm ein ähnliches Bild. Hierbei verlagern sich die höchsten Glühverluste leicht nordöstlich. Sie nehmen Werte von 25 bis 45 Gew.-% TM ein und zeigen somit ebenfalls eine Differenz von ca. 20 Gew.-% TM.

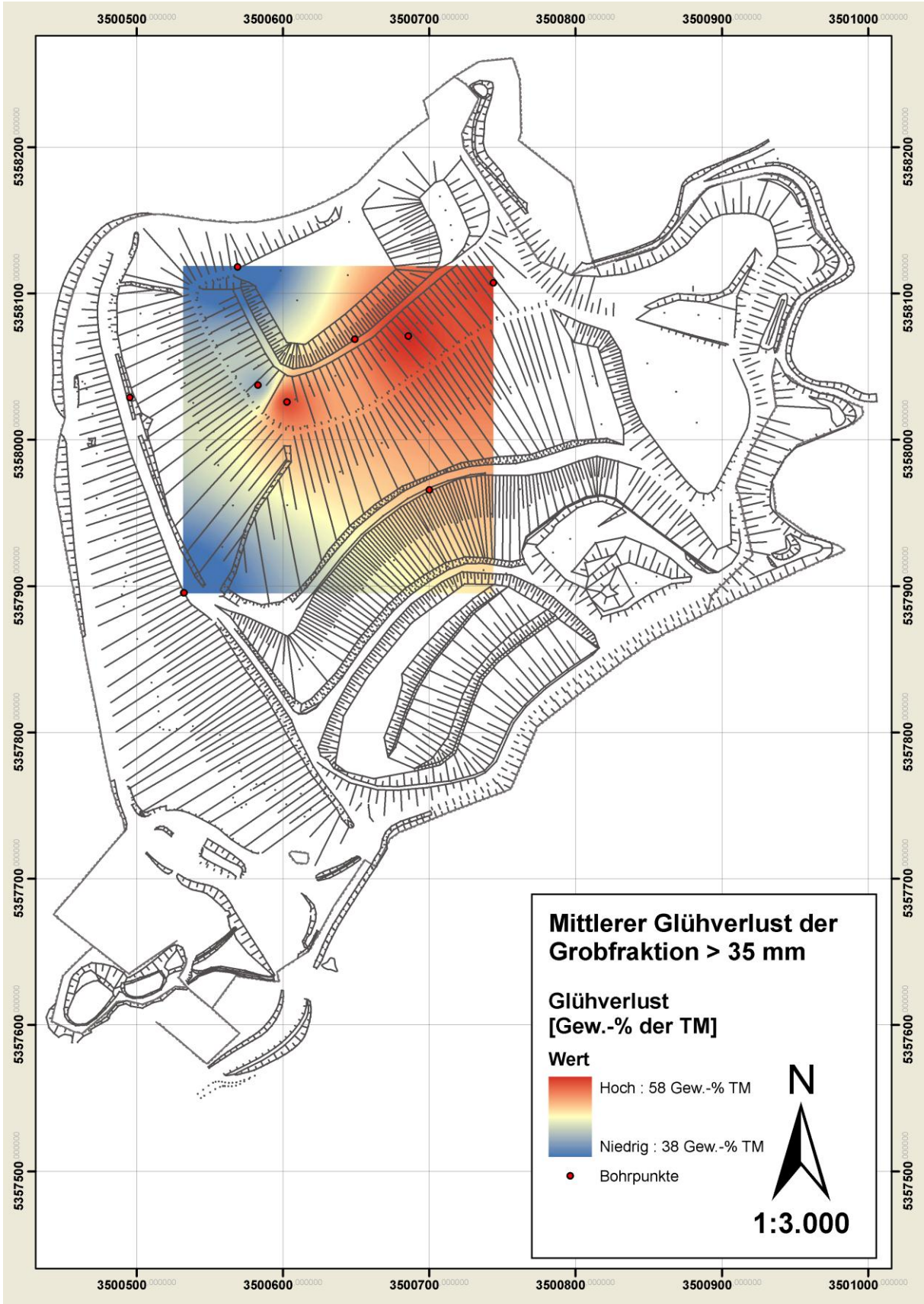


ABBILDUNG 61: RÄUMLICHE DARSTELLUNG DES MITTLEREN GLÜHVERLUSTES DER FRAKTION > 35 MM DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN



ABBILDUNG 62: RÄUMLICHE DARSTELLUNG DES MITTLEREN GLÜHVERLUSTES DER FRAKTION < 35 MM DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

STOFFSPEZIFISCH

Die mittleren stoffspezifischen Glühverluste sowie deren Abweichungen variieren in Abhängigkeit der physikalischen und chemischen Stoffeigenschaften stark. Stoffe wie Glas, Metalle und Mineralstoffe, die in diesem Fall lediglich Anhaftungen organischen bzw. kohlenstoffhaltigen Materials besitzen, zeigen daher mit ca. 0,1 bis 2,1 Gew.-% der TM die geringsten Werte. Die übrigen aufgeführten und als heizwertreich einzustufenden Fraktionen liegen mit Glühverlusten im Bereich von 33,8 bis 66,6 Gew.-% TM deutlich darüber.

Untersuchungen belegen in diesem Zusammenhang, dass ein oberer Heizwert von $6.000 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ einem Glühverlust von etwa 30 Gew.-% entspricht [UMWELTBUNDESAMT, 1999].

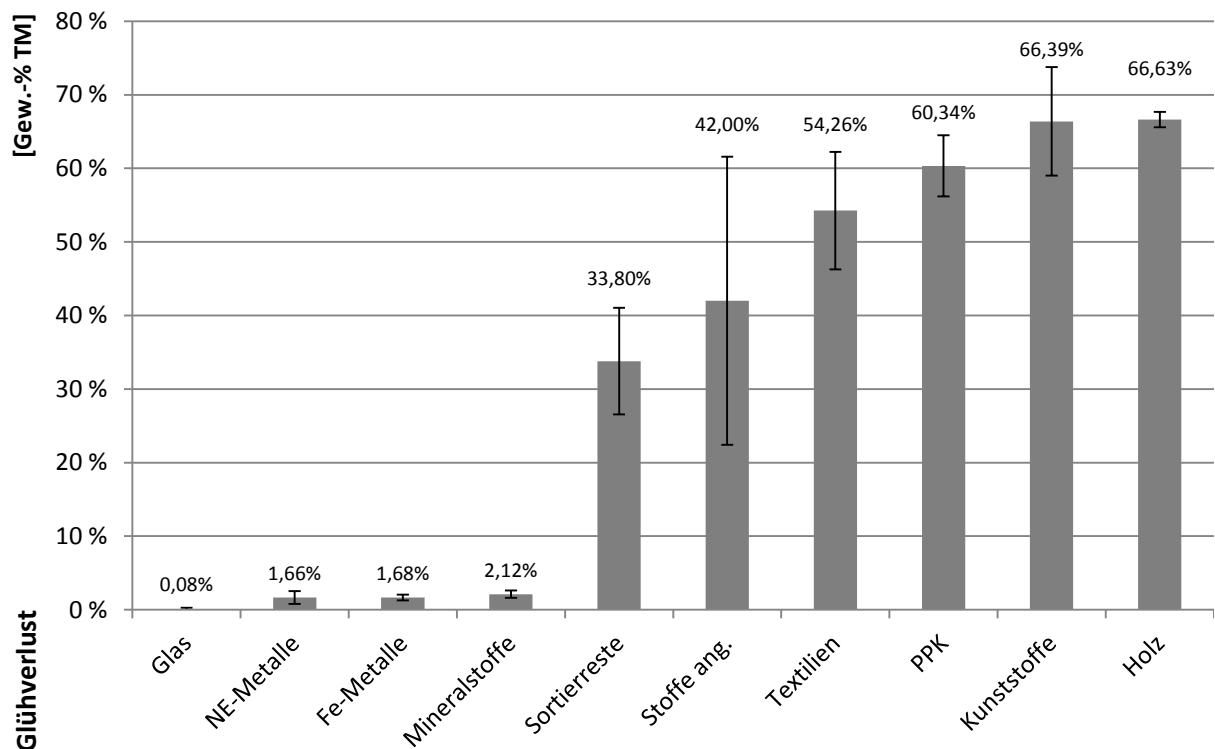


ABBILDUNG 63: MITTLERE STOFFSPEZIFISCHE GLÜHVERLUSTE UND DEREN STANDARDABWEICHUNG

5.2.2 PARAMETERABLEITUNG

Der Abbau der organischen Substanz und die spezifischen Wasserverhältnisse innerhalb des Deponiekörpers sowie der betrachteten Stofffraktionen bestimmen maßgeblich den Rohstoffwert einer Deponie. Diese werden daher nachfolgend näher erörtert und im Rahmen der Potenzialanalysen erneut aufgegriffen.

5.2.2.1 ABBAU DER ORGANISCHEN SUBSTANZ

Der Abbau der organischen Substanz kann indirekt über Formel 2 (Kapitel 2.4.1.4)⁴ bestimmt werden. Hierzu ist es zuvor notwendig eine Deponiegasprognose zu erstellen. Die so gewonnenen Erkenntnisse werden aus Abbildung 64 deutlich, wobei für jedes Ablagerungsszenario (MW, MIN, MAX) zwei Prognosen erstellt wurden, deren Eingangsparameter wie folgt zu definieren sind:

Variable:	Prognose I	Prognose II
C_{org} [kg*Mg ⁻¹]	150	200
k	0,040	0,035
T [°C]	32	33
Zeitraum	1982 - 2050	1982 - 2050

Die rechnerische Ermittlung der Deponiegasproduktion kommt zum Ergebnis, dass aktuell im Deponiekörper 5,4 bis 8,8 Mio. m³ Deponiegas pro Jahr gebildet werden. Der Vergleich dieser Daten mit Messdaten der Deponiegaserfassung zeigt, dass rein theoretisch lediglich 20 – 30 % der Gasmenge über die Entgasungsanlage gefasst werden. RETTENBERGER [1995] macht allerdings darauf aufmerksam, dass solche Vergleiche in den meisten Fällen zu einem zu geringen Wert des Erfassungsgerades führen.

Laut den Prognosen wird die Deponiegasproduktion mit Werten von 150.000 bis 380.000 m³*a⁻¹ bzw. 17 bis 43 m³*h⁻¹ bis zum Jahr 2050 nahezu abgeklungen sein.

Für den Abbau der organischen Substanz ergibt sich aus diesen Modellen die in Abbildung 65 dargestellte Situation. Demnach sind zum aktuellen Zeitpunkt etwa 201.000 bis 289.000 Mg FM der abgelagerten organischen Substanz abgebaut. In Abhängigkeit des betrachteten Szenarios kann sich diese Menge bis zum Jahr 2050 auf 241.000 bis 363.000 Mg FM steigern (siehe Anhang 55 bis 57).

⁴ Formel zur Berechnung des Abbaus der organischen Substanz: $C_{org} = \frac{G_t}{M * 1,868 * (0,014 * T + 0,28) * (1 - 10^{-kt})}$

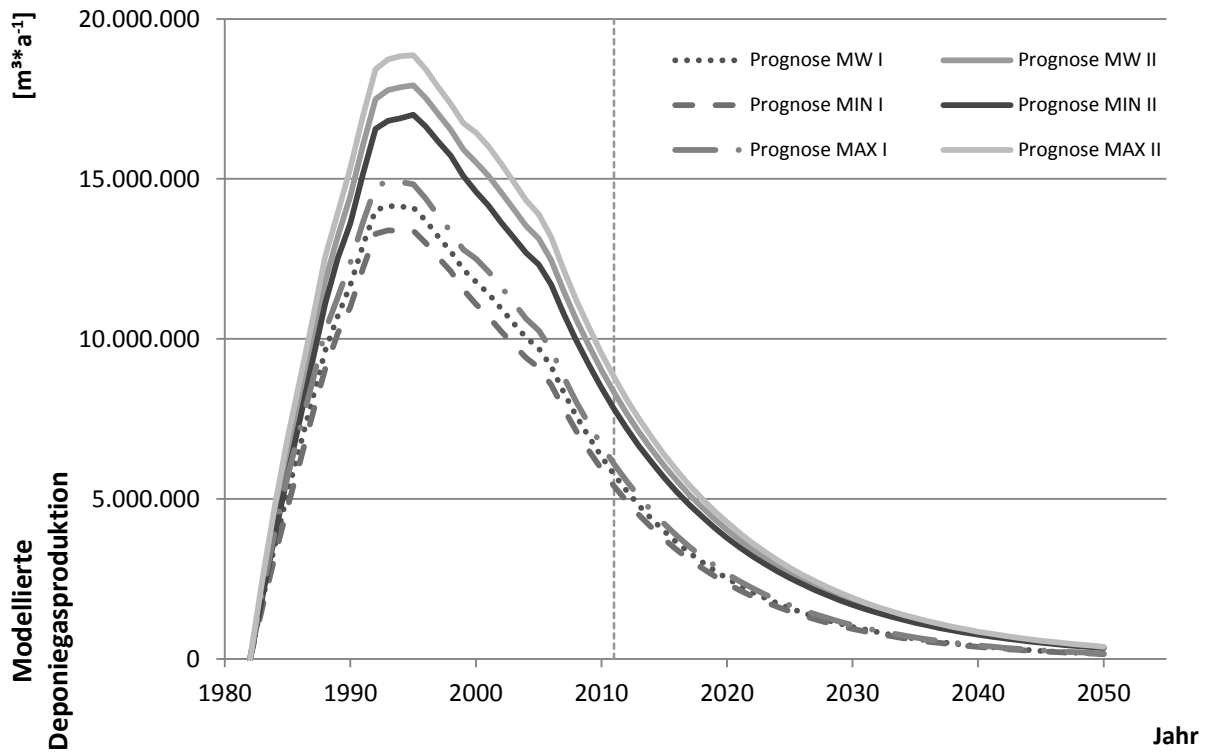


ABBILDUNG 64: MODELLIERTE JÄHRLICHE DEPONIEGASPRODUKTION DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

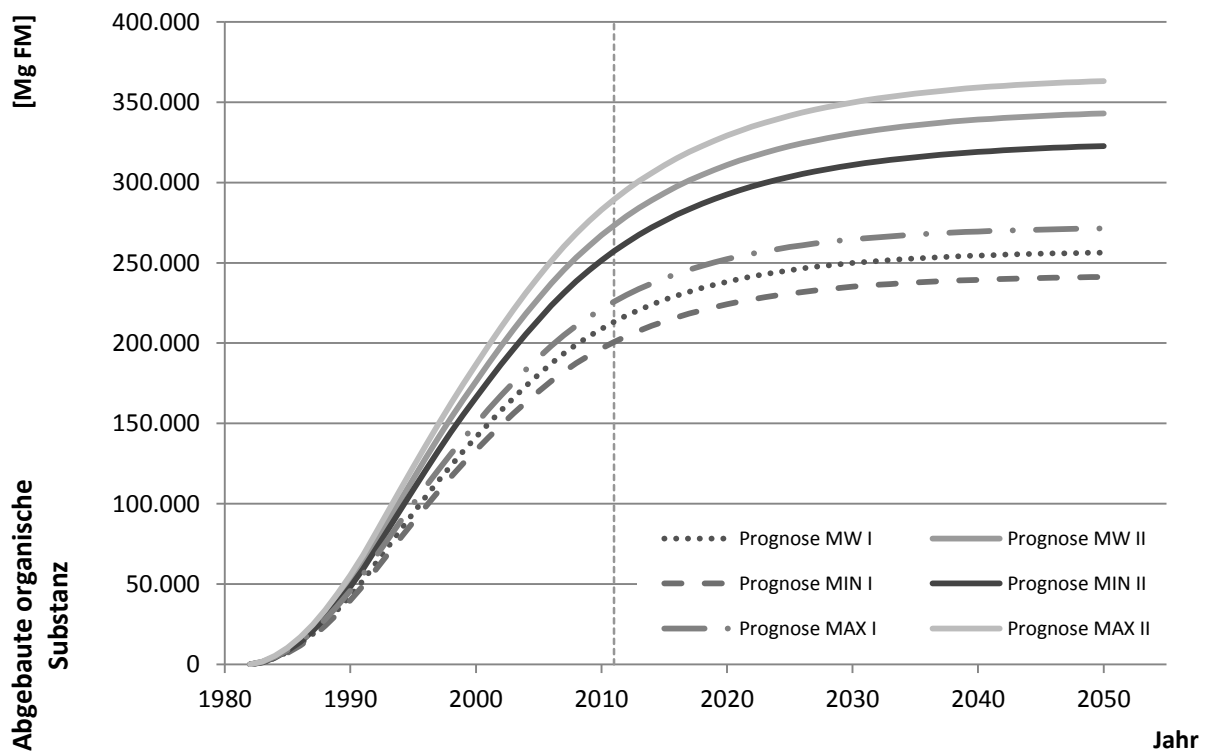


ABBILDUNG 65: IM RAHMEN DER DEPONIEGASPRODUKTION MODELLIERTER ABBAU DER ORGANISCHEN SUBSTANZ | SUMMENKURVE

5.2.2.2 WASSERGEHALT

Aufgrund der Tatsache, dass konkrete Messergebnisse zum Wassergehalt der einzelnen Klassier- und Stofffraktionen vorliegen, wird an dieser Stelle auf die theoretische Ermittlung verzichtet. Die nachfolgend berücksichtigten Wassergehalte sind Tabelle 28 zu entnehmen. Eine detaillierte Auswertung zum vorgefundenen Wassergehalt ist in Kapitel 5.2.1.2 zu finden.

TABELLE 28: KENNWERTE DER WASSERGEHALTE DER STOFFFRAKTIONEN IN GEW.-% DER FM

Stoffgruppe	Mittelwert	Min	Max
Fe-Metalle	1,4%	0,9%	2,2%
NE-Metalle	2,0%	0,3%	2,9%
PPK	58,1%	53,0%	62,4%
Glas	1,8%	1,4%	2,6%
Kunststoffe	10,6%	7,1%	14,1%
Organik	56,2%	52,1%	59,0%
Holz	56,2%	52,1%	59,0%
Textilien	52,4%	46,9%	57,4%
Mineralstoffe	11,0%	7,5%	13,2%
Verpackungen	40,6%	36,9%	44,5%
Kompl. Produkte	40,6%	36,9%	44,5%
Schadstoffe	18,0%	8,4%	24,8%
Stoffe ang.	53,3%	44,3%	61,3%
Fraktion < 35 mm	43,7%	24,1%	57,6%
Sortierreste > 35 mm	41,9%	32,4%	52,6%
Schlämme	85,0%	75,0%	95,0%

5.2.3 THEORETISCHES RESSOURCENPOTENZIAL

5.2.3.1 HAUSMÜLLZUSAMMENSETZUNG

Die Zusammensetzung von Abfällen aus Haushaltungen ist von zahlreichen sozialen und regionalen Faktoren abhängig [VGL. BSPW. BILITEWSKI ET AL., 2000; KRANERT & CORD-LANDWEHR, 2010]. Dennoch bietet die Ableitung des bundesdeutschen Trends die Möglichkeit, die Rohstofffrachten im Bereich der Hausmüllablagerung zu modellieren und näher zu charakterisieren.

Aufgrund fehlender statistischer Auswertungen zu den Wirkungen abfallwirtschaftlicher Maßnahmen im Zollernalbkreis kann an dieser Stelle kein regionalspezifisches Szenario abgeleitet werden.

LINEARER BUNDESDEUTSCHER TREND

Die Abbildungen 66 bis 78 beschreiben die abgeleiteten linearen Funktionen zur zeitlichen Entwicklung der Zusammensetzung von Abfällen aus Haushalten. Neben der angegebenen durchschnittlichen Zusammensetzung ermöglicht das jahresspezifische $KI_{95\%}$ die Beurteilung der Abweichungen.

In diesem Zusammenhang weisen die Stofffraktionen Metalle, PPK, Glas und Organik einen negativen Trend auf. Dies bedeutet, dass älterer Hausmüll ein höheres Potenzial dieser Fraktionen vermuten lässt.

Als Ursache für diese Entwicklung kann das zunehmende Verständnis für die Werthaftigkeit dieser Abfall- bzw. Rohstoffe gesehen werden. Der Gedanke Abfall sei nur „Materie am falschen Ort“ von

THIESING aus dem Jahr 1927 wurde aufgrund der Wirtschafts- und Umweltkrise zum aktuellen Diskussionsthema dieser Zeit [KÖSTERING, 2007]. Wie unter anderem HÖSEL [1974] sind viele Abfall Experten der Auffassung, dass unter Berücksichtigung von ökologischen Kriterien, Wirtschaftlichkeitsrechnungen der Abfallbeseitigung und zunehmender Rohstoffverknappung das Recycling von Rohstoffen aus Abfällen ein vielversprechender Weg ist. Vor diesem Hintergrund erarbeitete die Bundesregierung 1975 ein neues Abfallwirtschaftsprogramm mit dem Schwerpunkt Recycling. Kern des Programms war die Reduzierung der Abfälle auf Produktions- und Verbrauchsebene sowie die Nutzbarmachung von Abfällen durch energetische oder stoffliche Verwertung in einem ökonomisch und ökologisch vertretbaren Rahmen [KARNOWSKY, 1978]. Die theoretische Umsetzung dieses Programms erfolgte im Jahr 1976 durch die Novellierung des Abfallbeseitigungsgesetzes. Dies hatte zur Folge, dass auf wissenschaftlicher Ebene zahlreiche Modellprojekte zur gezielten und effizienten Rückgewinnung von Wertstoffen aus Abfällen gestartet wurden. Hierbei zeigte sich, dass die getrennte Abfallsammlung aufgrund einer hohen Bereitschaft der Bevölkerung gute Ergebnisse lieferte. In der Praxis konnten Recyclingsysteme jedoch erst zu Beginn der achtziger Jahre vereinzelt realisiert werden [JINHEE PARK, 2004].

Entgegengesetzte Entwicklungen ergeben sich für Kunststoffe, Textilien, Mineralstoffe, Stoffe ang. sowie die Rest- und Feinfraktion. Ihr Anteil im Hausmüll nimmt dementsprechend mit den Jahren stetig zu.

Komplexe Produkte, Verpackungen und Schadstoffe lassen keinen zeitlichen Trend erkennen und halten sich über den betrachteten Zeitraum auf einem konstanten Niveau (Abbildungen 66 bis 78).

Lebensstandard und Konsumgewohnheiten spielen in diesem Kontext eine entscheidende Rolle für die Zusammensetzung von Siedlungsabfällen.

Der Begriff Lebensstandard ist hierbei weiträumiger zu sehen. Für Lebensstandard im weiteren Sinne, sind neben Größen wie dem Bruttoinlandsprodukt auch Faktoren wie etwa Lebensgewohnheiten, Verpackungseinsatz, Nutzungsdauer und Verwertungspotenzial entscheidend. Diese beeinflussen die Abfallmenge erheblich, da die Versorgung der Bevölkerung mit Konsum- und Investitionsgütern von ihnen abhängt. Zudem können konjunkturelle Entwicklungen Einfluss auf das Kaufverhalten und somit auf die aus den Produktions-, Handels- und Dienstleistungssektoren stammenden Abfälle haben [BIDLINGMAIER & KRANERT, 2004].

Hierbei war die Abfallmenge und –zusammensetzung der vorindustriellen Zeit wesentlich durch Küchenabfälle, Hauskehricht und Rückstände aus der Ofenfeuerung geprägt. Konsumgüter fielen aufgrund ihres hohen Preises ausschließlich in geringen Mengen an. Verpackungen bestanden aus natürlichen Materialien und wurden oftmals mehrfach verwendet.

Dieser starke Wandel der Abfallmenge und –zusammensetzung verlief parallel zur Verbesserung der Wohn- und Lebensverhältnisse am Ende des Zweiten Weltkriegs. Der wirtschaftliche Aufschwung, die veränderte Bedürfnisstruktur der Konsumenten und ein stetig wachsendes Warenangebot führten zu verkürzten Fluktuationsraten von Konsumgütern sowie zu einer breiteren stofflichen Zusammensetzung der Abfälle [DÖPPENSCHMITT, 1993].

Im Bereich der Konsumgüter bedeutete dies, dass Geräte wie bspw. Radios, Fernseher, Kühlschränke und ähnliches bereits vor Ablauf ihrer technischen Lebensdauer ersetzt wurden und Altgeräte entsprechend der damaligen Entsorgungsstruktur und aus Gewohnheit auch noch später auf Deponien landeten [BMU, 1988].

Für die Änderung der stofflichen Abfallzusammensetzung sind nach DÖPPENSCHMITT [1993] der Wandel der Einzelhandelsstruktur, der Wohnsituation, der Lebensgewohnheiten, der

Haushaltsführung und der Haushaltsgrößen verantwortlich. So nahm parallel zur industriellen Entwicklung der Anteil der städtischen Bevölkerung stetig zu, wobei die Haushaltsgröße im Zeitraum von 1950 bis 1986 von 2,99 auf 2,29 Personen pro Haushalt abnahm. Diese Entwicklung führte dazu, dass einerseits die Selbstversorgung der Bevölkerung mit Produkten aus eigener Erzeugung abnahm und verstärkt Produkte des Einzelhandels nachgefragt wurden. Damit diese frisch und unbeschadet beim Verbraucher ankommen, bedarf es einer schützenden Verpackung. Der steigende Anteil an Single- und kinderlosen Haushalten begünstigte zudem den Konsum von aufwendig verpackten Fertigprodukten. Bequemlichkeit und Zeitersparnis bei der Haushaltsführung hatte Priorität – die getrennte Erfassung der daraus resultierenden Abfallstoffe jedoch nicht.

Kunststoffe, komplexe Verpackungsmaterialien etc. aber auch Schadstoffe landeten demnach weiterhin im Hausmüll und somit auch auf Deponien. Deren prozentualer Anstieg bzw. deren Stagnation auf einem einheitlichen Niveau ist demnach letztlich auf die Separation zuvor genannter Stoffgruppen (Metalle, PPK, Glas und Organik), bei gleichzeitigem höheren Anfall der übrigen Abfallbestandteile und unzureichender Trennleistung, zurückzuführen.

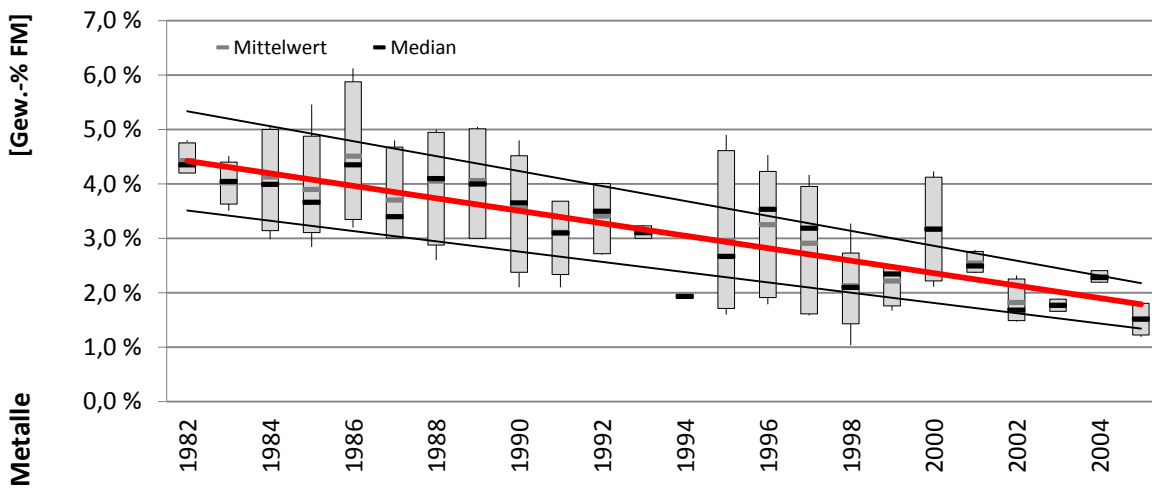


ABBILDUNG 66: ZEITSPEZIFISCHE ENTWICKLUNG DES METALL-GEHALTS IM HAUSMÜLL | LINEARER TREND

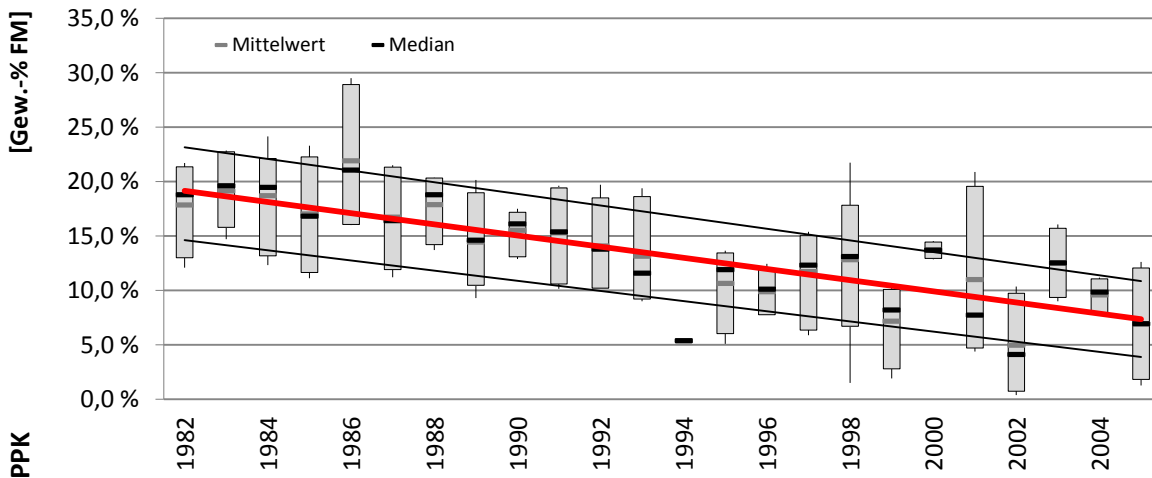


ABBILDUNG 67: ZEITSPEZIFISCHE ENTWICKLUNG DES PPK-GEHALTS IM HAUSMÜLL | LINEARER TREND

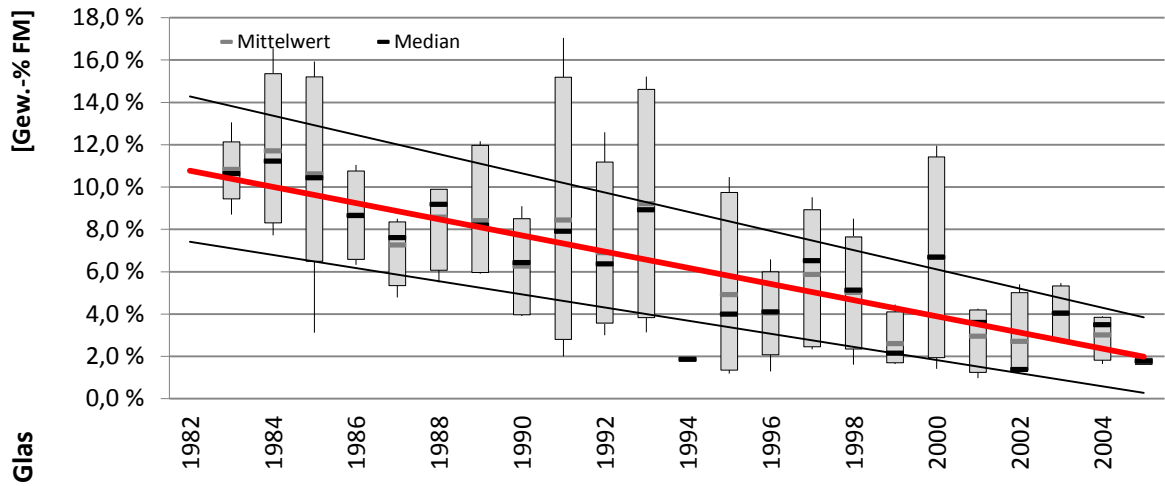


ABBILDUNG 68: ZEITSPEZIFISCHE ENTWICKLUNG DES GLAS-GEHALTS IM HAUSMÜLL | LINEARER TREND

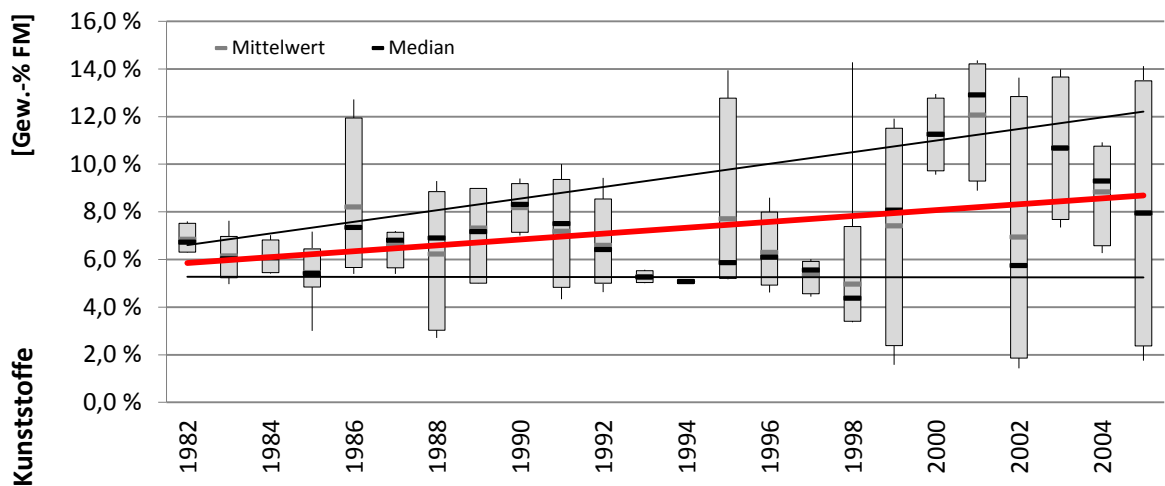


ABBILDUNG 69: ZEITSPEZIFISCHE ENTWICKLUNG DES KUNSTSTOFF-GEHALTS IM HAUSMÜLL | LINEARER TREND

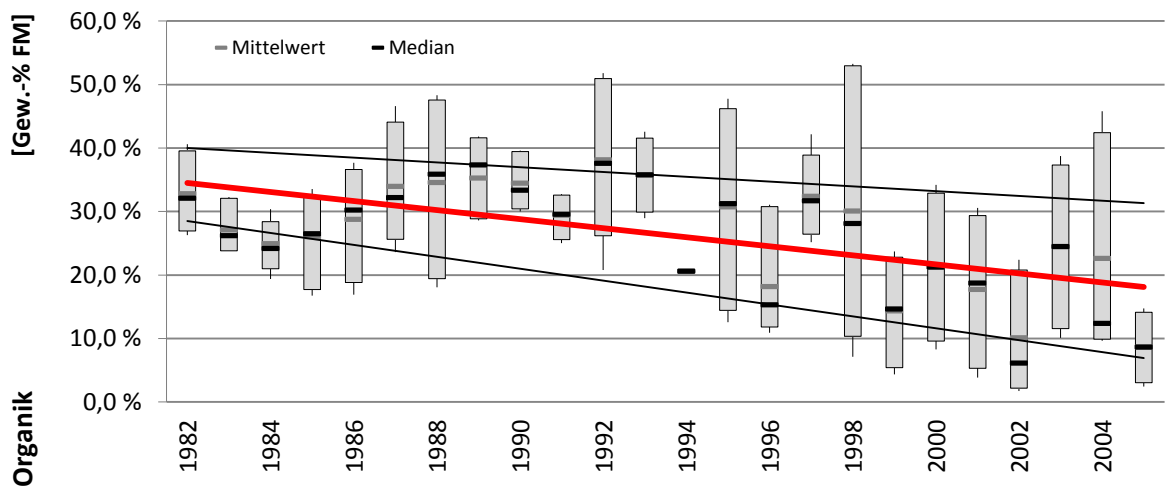


ABBILDUNG 70: ZEITSPEZIFISCHE ENTWICKLUNG DES ORGANIK-GEHALTS IM HAUSMÜLL | LINEARER TREND

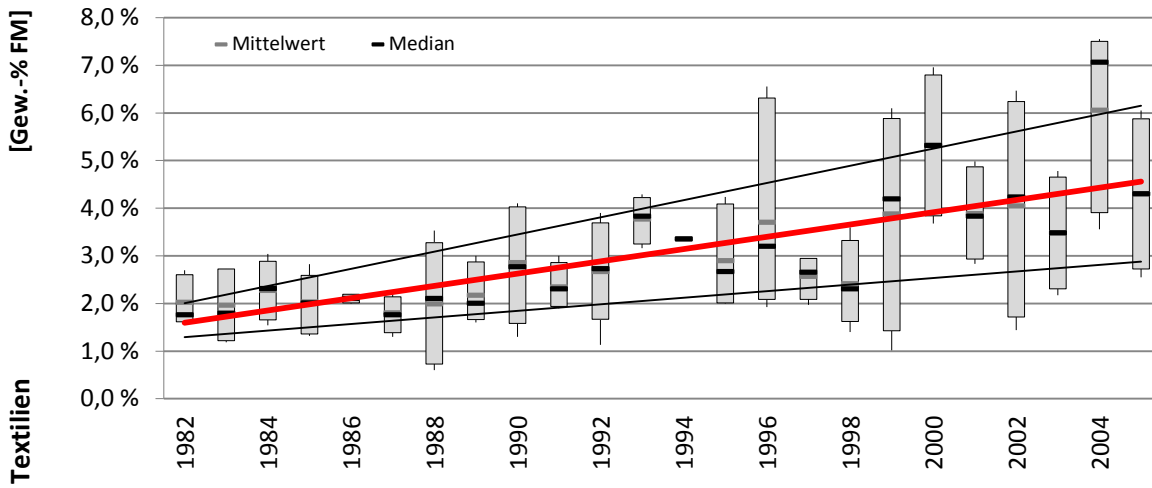


ABBILDUNG 71: ZEITSPEZIFISCHE ENTWICKLUNG DES TEXTILIEN-GEHALTS IM HAUSMÜLL | LINEARER TREND

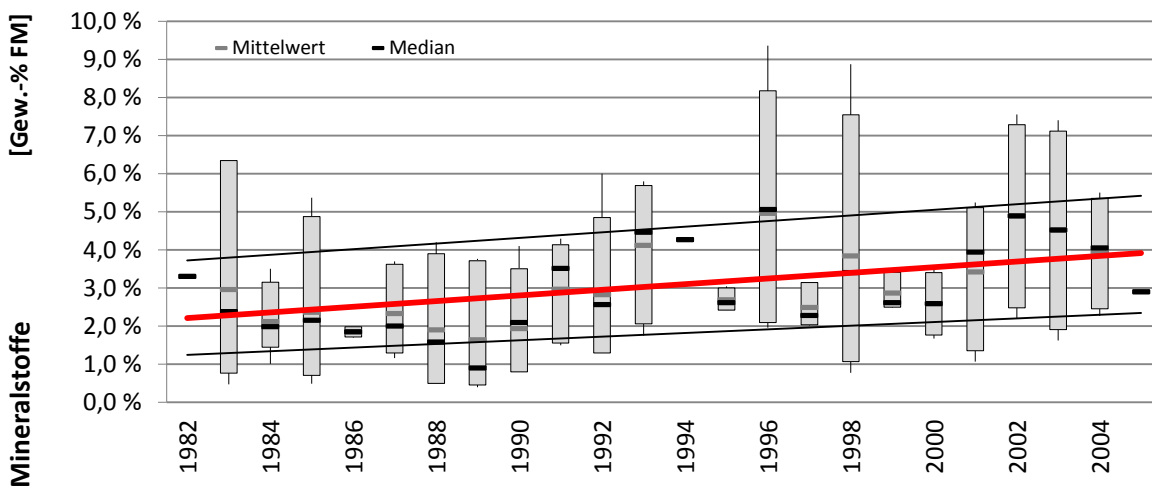


ABBILDUNG 72: ZEITSPEZIFISCHE ENTWICKLUNG DES MINERALSTOFF-GEHALTS IM HAUSMÜLL | LINEARER TREND

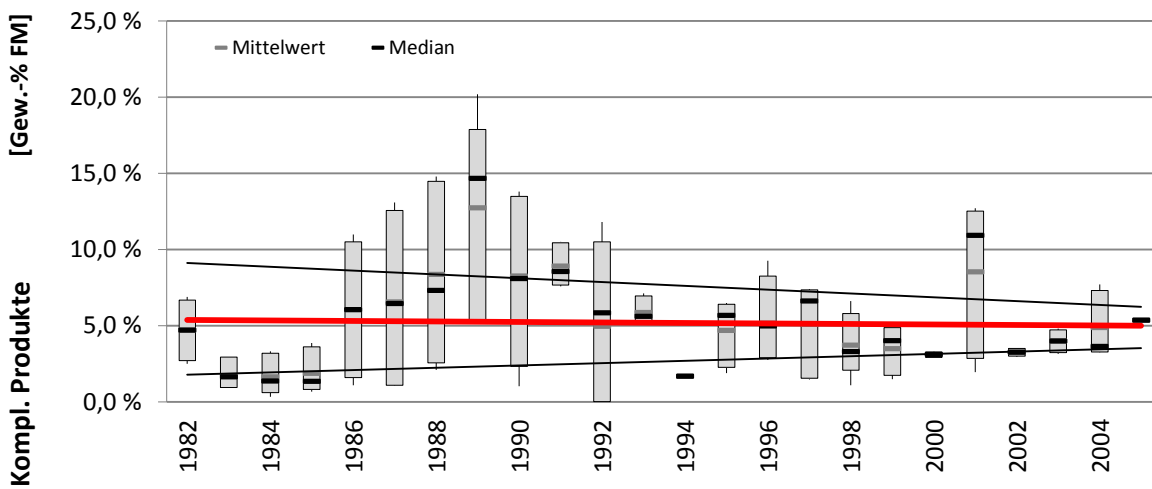


ABBILDUNG 73: ZEITSPEZIFISCHE ENTWICKLUNG DES GEHALTS AN KOMPLEXEN PRODUKTEN IM HAUSMÜLL | LINEARER TREND

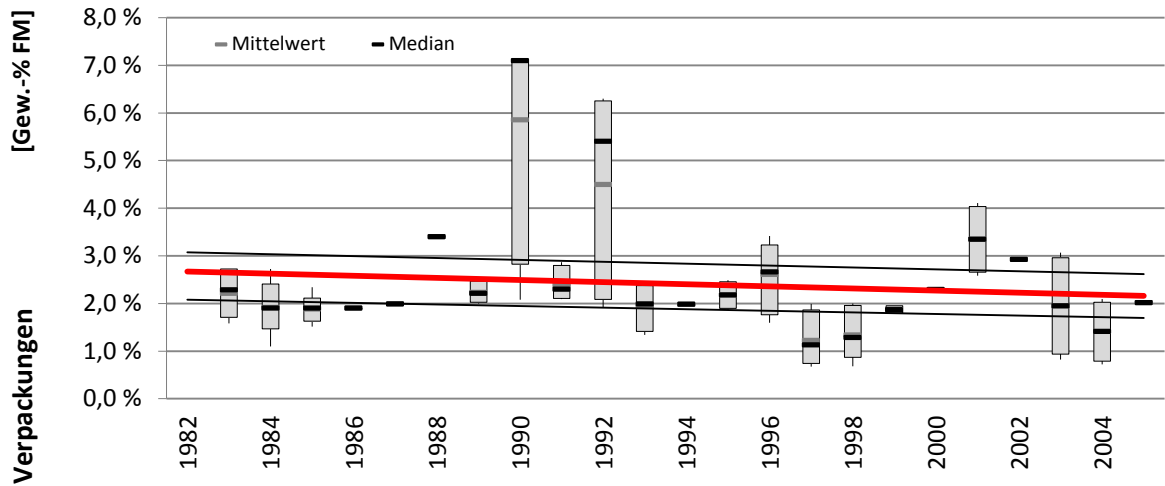


ABBILDUNG 74: ZEITSPEZIFISCHE ENTWICKLUNG DES GEHALTS AN VERBUNDVERPACKUNGEN IM HAUSMÜLL | LINEARER TREND

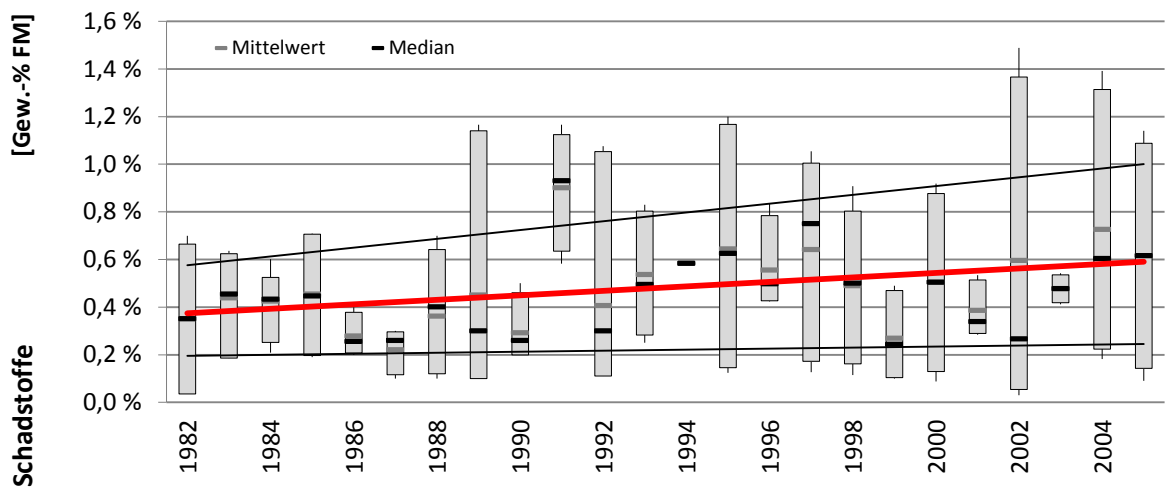


ABBILDUNG 75: ZEITSPEZIFISCHE ENTWICKLUNG DES SCHADSTOFF-GEHALTS IM HAUSMÜLL | LINEARER TREND

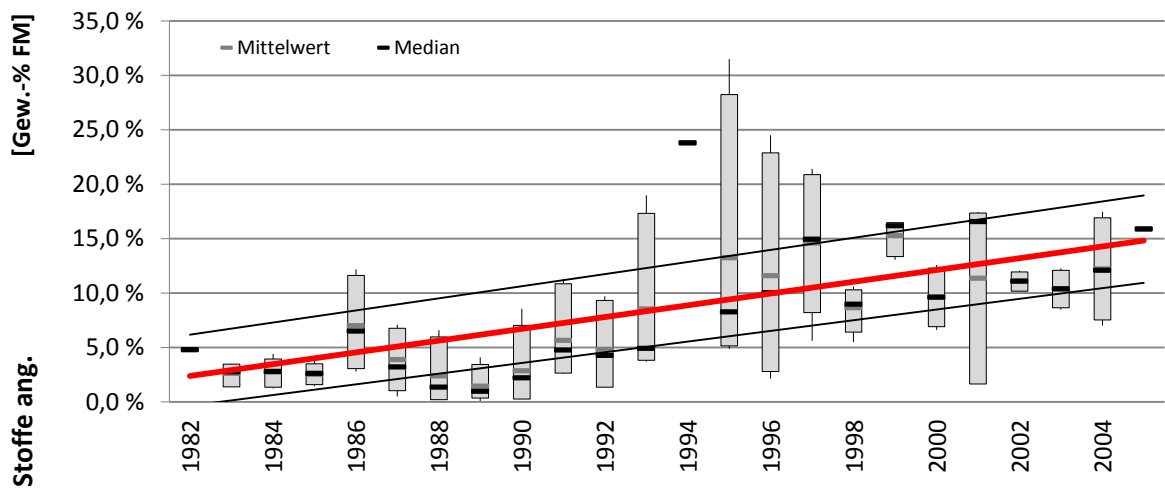


ABBILDUNG 76: ZEITSPEZIFISCHE ENTWICKLUNG DES GEHALTS AN STOFFEN ANG. IM HAUSMÜLL | LINEARER TREND

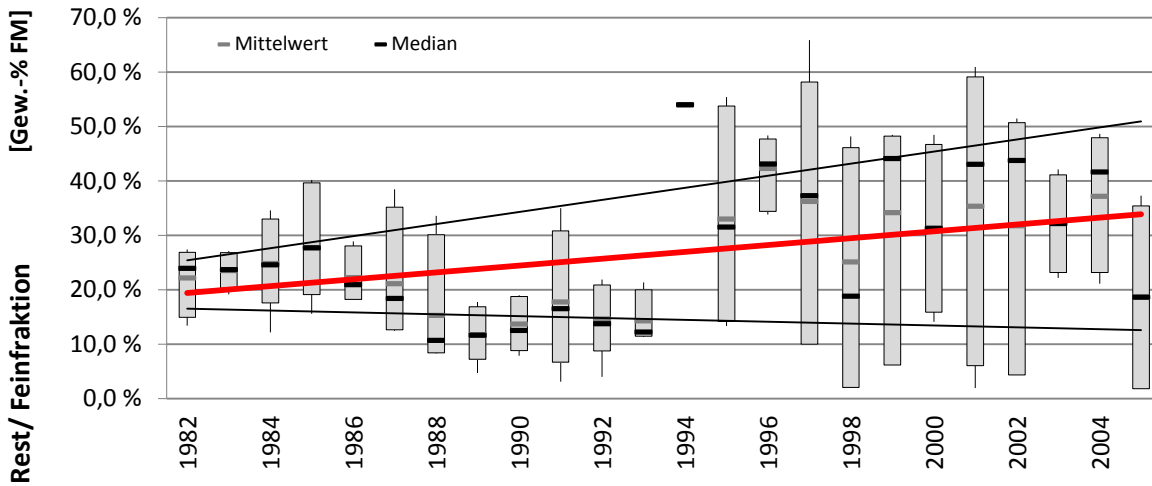


ABBILDUNG 77: ZEITSPEZIFISCHE ENTWICKLUNG DES GEHALTS AN REST- UND FEINMATERIALIEN IM HAUSMÜLL | LINEARER TREND

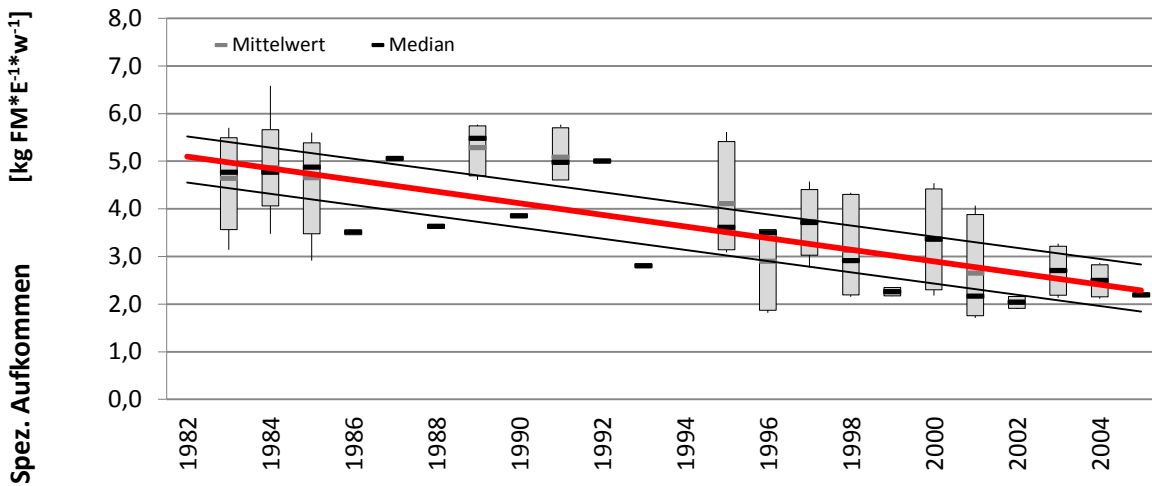


ABBILDUNG 78: ZEITSPEZIFISCHE ENTWICKLUNG DES SPEZIFISCHEN HAUSMÜLLAUFKOMMENS | LINEARER TREND

Auf Basis einer tieferen Differenzierungsebene ist es zudem möglich, die Fraktionsgruppe der Metalle in Fe- und NE-Metalle zu gliedern. Die jahresspezifischen Anteile der NE-Metalle am Gesamtmetallgehalt wird hierbei aus Abbildung 79 deutlich.

Zu erkennen ist, dass im Zeitraum von 1975 bis 2009 ein deutlicher Anstieg des Anteils der NE-Metalle an den jährlichen Gesamtmetallanteilen zu verzeichnen ist. Im Mittel kann dieser für weitere Analysen mit 21 Gew.-% der FM angesetzt werden.

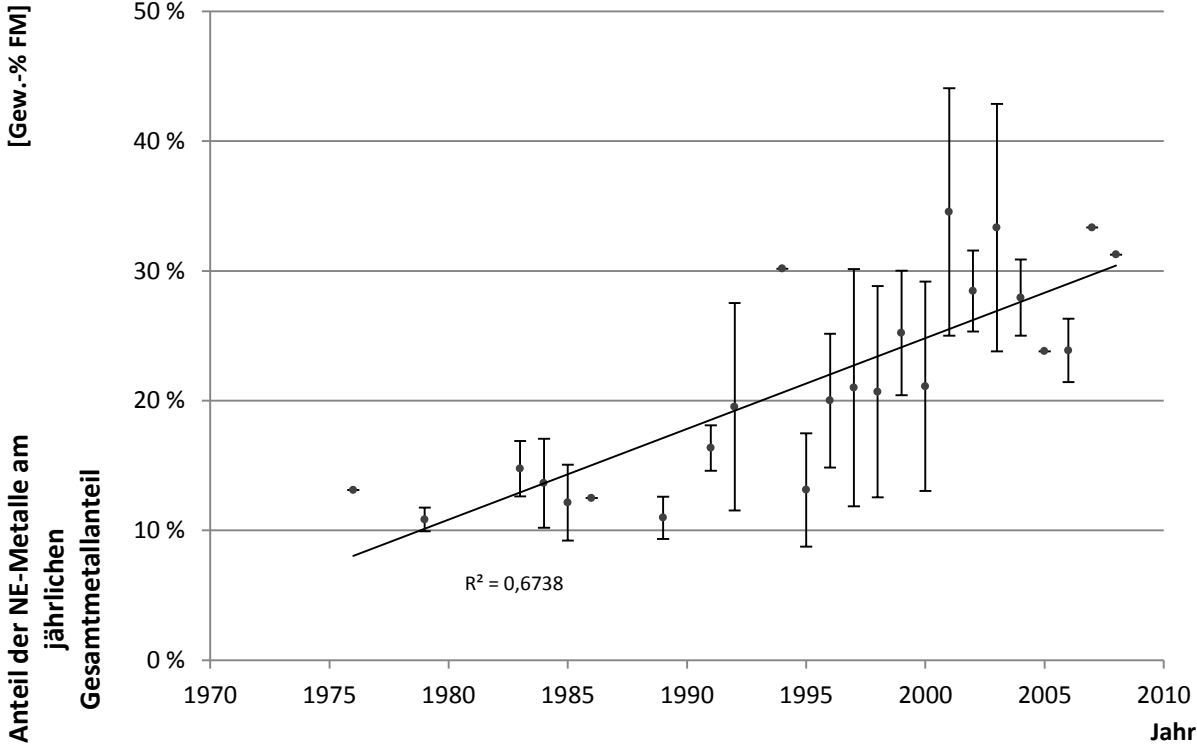


ABBILDUNG 79: VERÄNDERUNG DES ANTEILS DER NE-METALLE GEMESSEN AM JAHRESSPEZIFISCHEN GESAMTMETALLGEHALT

5.2.3.2 GEWERBEABFALLZUSAMMENSETZUNG

Neben Abfällen aus Haushalten stammt ein Großteil der kommunal anfallenden Abfälle aus Betrieben und Arbeitsstätten unterschiedlichster Art. Ansässige Dienstleister, Verwaltungseinrichtungen, Produzenten etc. erzeugen dabei zum Teil große Mengen Abfall, die teilweise gemeinsam mit dem Hausmüll (Geschäftsmüll, hausmüllähnlicher Gewerbeabfall) auf Deponien verbracht wurden und teilweise separat (Sonderabfälle) entsorgt wurden [MÜLLER ET AL., 1994].

Den Großteil der gewerblichen Abfälle machen in diesem Zusammenhang die heute auf unseren Deponien lagernden hausmüllähnlichen Abfälle aus.

Bei der Fragestellung des daraus resultierenden Ressourcenpotenzials stehen vor allem Geschäftsmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle im Vordergrund. Diese sind nach Angaben des BAYERISCHEN LANDESAMTES FÜR UMWELT [2011a] wie folgt zu definieren.

Geschäftsmüll: Geschäftsmüll umfasst Abfälle, die in kleineren Gewerbebetrieben, Behörden, Schulen usw. anfallen und gemeinsam mit dem Hausmüll entsorgt werden.

Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle: Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle sind Abfälle, die aus größeren Gewerbebetrieben und Institutionen stammen, getrennt vom Hausmüll erfasst werden, jedoch aus ähnlichen Stoffen wie Hausmüll bestehen.

Dabei erfolgt die Zuordnung zum Geschäftsmüll oder hausmüllähnlichem Gewerbeabfall ausschließlich über die Art der Abfuhr [MÜLLER ET AL., 1994]. Aus diesem Grund wird im Weiteren ausschließlich der Begriff des Gewerbeabfalls verwendet, der hinsichtlich der spezifischen Zusammensetzung sowohl den Geschäftsmüll als auch den hausmüllähnlichen Gewerbeabfall umfasst.

Eine in der Literatur beschriebene Zusammensetzung von Gewerbeabfällen ist in Tabelle 29 aufgeführt. Da die genannten Untersuchungen sowohl zu unterschiedlichen Zeitpunkten als auch mit verschiedenen Methoden durchgeführt wurden, sind manche Stoffgruppen nicht angegeben bzw. in anderen Stoffgruppen enthalten.

Die Ergebnisse zeigen dennoch, dass hohe Anteile (mehrheitlich > 20 %) bei den Stoffgruppen „native Organika“ und „Papier, Pappe, Kartonage“ vorzufinden sind. Glas und Kunststoffe liegen durchschnittlich bei etwa 7 und 8 %. Untergeordnete Bedeutung haben in den meisten Fällen Textilabfälle und Problemabfall sowie Schadstoffe. Die übrigen Stoffgruppen bewegen sich im Bereich von 2 bis 5 %. Die Gruppe Sonstiges beinhaltet zum Teil hausmüllartige Abfälle, wodurch die teilweise auftretenden hohen Anteile zu erklären sind. Dies bedingt zudem geringere Anteile der übrigen Fraktionen [UMWELTBUNDESAMT, 1994].

Insgesamt ist festzuhalten, dass in Abhängigkeit der Gebietsstruktur und der spezifischen Branchenzusammensetzung große Variationen der Zusammensetzung von Gewerbeabfällen auftreten können [BILITEWSKI ET AL., 2000].

TABELLE 29: ABFALLZUSAMMENSETZUNG VON GEWERBEABFÄLLEN ABGEÄNDERT NACH BIDLINGMAIER & KRANERT [2004]

Untersuchungsort	Berlin	Bad Segeberg	Augsburg	Nds. LK	Saarland	Böblingen	Hannover	Berlin	Ludwigsburg	Großstadt NRW	Braunschweig	BWGU
Quelle	[FLUCHS, 1987]	[KRUSE, 1987]	[BAYRISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ, 1984]	[LEWISER & MATSCHKE, 1993]	[BAUR ET AL., 1996]	[ARGUS, 1995]	[HANNOVER, 1996]	[BERLIN, 2000]	[AWIPLAN, 1994]	[ARGUS, 1999]	[KRANERT ET AL., 1995]	[UMWELTBUNDESAMT, 1994]
Zusammensetzung Angaben in %												
Feinfraktion (< 10 mm)	^a	5	2,4	^a	^a	3,9	4,4	7,4	^a	5	1,5	4,1
native Organika	2,9	46	22,2	22,3	26,7	30,9	34	35,4	0,7	31,2	15,9	13,1
Papier, Pappe, Kartonage	22,4	18,3	26,3	45,4	25,7	24,1	23	17,6	14,9	21	26,6	16,8
Glas	11,2	7,3	13,1	10,9	6,6	4,1	5,9	13	0,1	4,8	6,4	5,6
Kunststoffe	5,8	10,9	11,6	6,9	6	14,7	9,8	6	3,2	8,8	12,8	5,8
Metalle (NE, Fe)	4,8	4,5	3	6	3	4,1	4,9	5,1	0,7	3	4,6	2,2
Verbund	^a	2,2	9,4 ^c	^a	2,1	0,6	0,8	3,4	1,9	7,1	14,1	0,7 ^e
Baustoffe	3,5	0,8	5,8	5,6 ^d	1,3	4	3,1	2,3	2,3	5,3	2,5	3,4
Holz	1,5	1,5	^a	1,7	0,8	2,6	3,1	5,3	2,4	3,9	13,9	3
Textilien	^a	1,2	1,8	0,5	1,1	2,1	1,3	2,2	0,4	2,9	0,2	0,7
Problemstoffe	^a	1,4	x	x	0,8	0,2	3,4	0,4	2,4 ^f	1,9	0,1	^a
Sonstiges	47,9 ^b	0,9	4,4	0,7	25,9	8,7	6,3	1,9	71 ^b	5,1	1,4	44,6

^a: in anderen Stoffgruppen enthalten
^b: inklusive hausmüllartigen Abfällen
^c: inklusive Leder, Holz und ähnlichem
^d: inklusive Baustellenabfällen
^e: nur Papierverbund
^f: inklusive Elektroschrott

Unter Berücksichtigung dieser Aspekte und den Interpretationsmöglichkeiten der zusammengetragenen Gewerbeabfallanalysen ist eine differenzierte Betrachtung der Zusammensetzung für folgende Gewerbebranchen möglich:

- Baugewerbe
- Dienstleistung
- Handel
- Öffentliche Einrichtungen
- Sonstige Wirtschaftszweige
- Verarbeitendes Gewerbe

Zusätzlich bieten die in den Abbildungen 80 bis 94 aufgeführten Varianten „Keine Differenzierung“ und „Alle Wirtschaftszweige“ eine branchenunabhängige Einschätzung der Zusammensetzung von Gewerbeabfällen. Es ist zu beachten, dass aufgrund größerer Anteilsunterschiede keine einheitliche Ordinate gewählt werden konnte.

Eine weitere zeitliche Differenzierung der Zusammensetzung ist an dieser Stelle aufgrund der Ausgangsdatenlage nicht möglich. Dennoch gilt es zu berücksichtigen, dass mit Erlass der Gewerbeabfallverordnung [GEWABFV, 2003] für die Erzeuger und Besitzer von gewerblichen Siedlungsabfällen die Verpflichtung zur Getrennthaltung von Papier und Pappe, Glas, Kunststoffen, Metallen, biologisch abbaubaren Küchen- und Kantinenabfällen, biologisch abbaubaren Garten- und Parkabfällen sowie Marktabfällen besteht.

Untersuchungen zur qualitativen und quantitativen Wirkung dieser Gesetzesänderung auf die Gewerbeabfallzusammensetzung existieren jedoch nicht, sodass an dieser Stelle für die betroffenen Stoffgruppen die mittleren branchenbezogenen Zusammensetzungen angenommen werden.

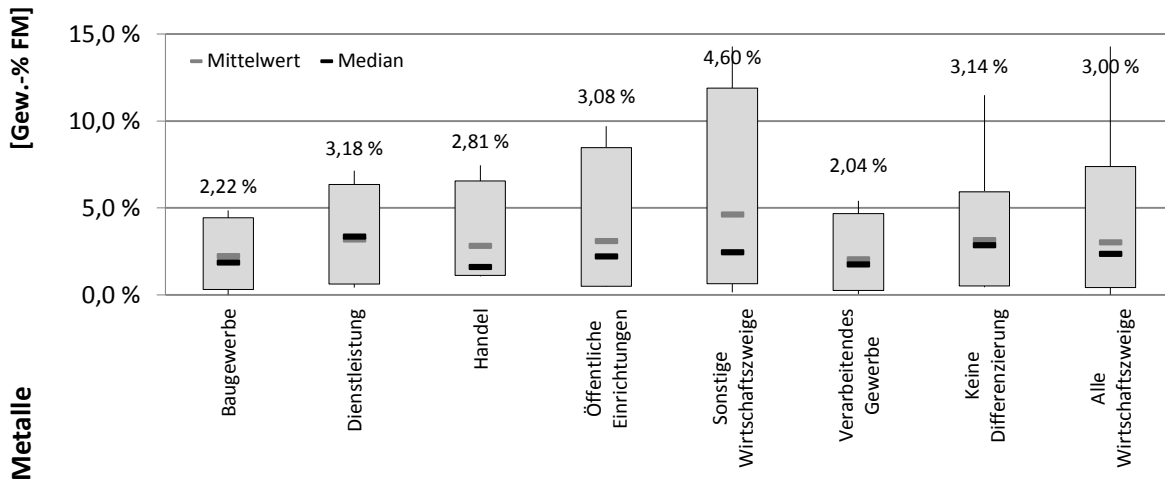


ABBILDUNG 80: METALL-GEHALT IM GEWERBEABFALL NACH BRANCHEN

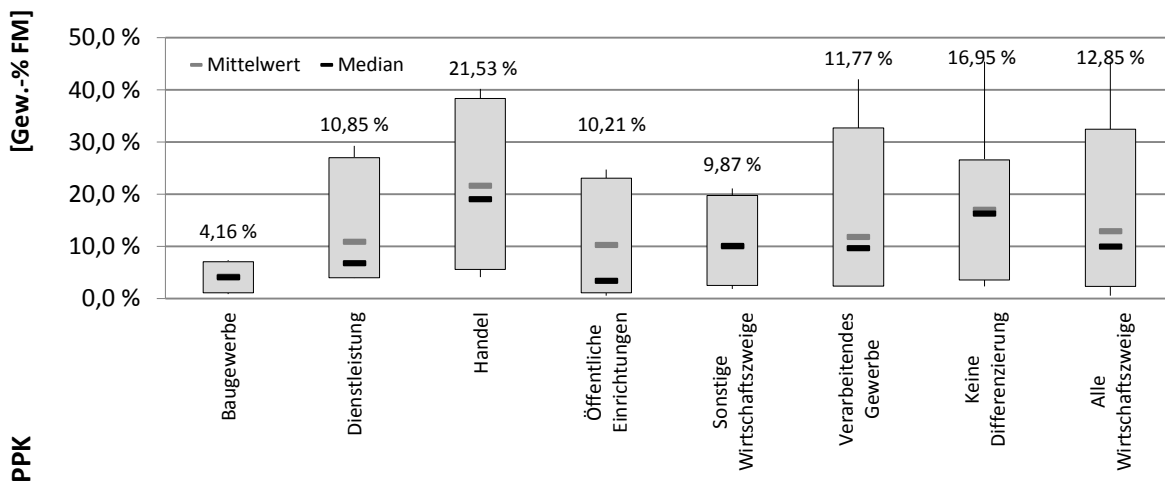


ABBILDUNG 81: PPK-GEHALT IM GEWERBEABFALL NACH BRANCHEN

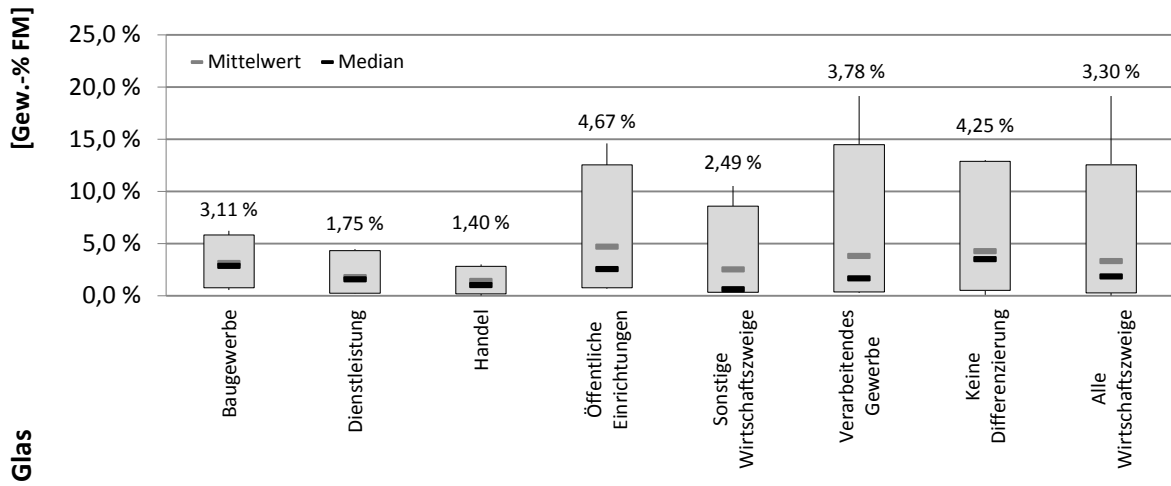


ABBILDUNG 82: GLAS-GEHALT IM GEWERBEABFALL NACH BRANCHEN

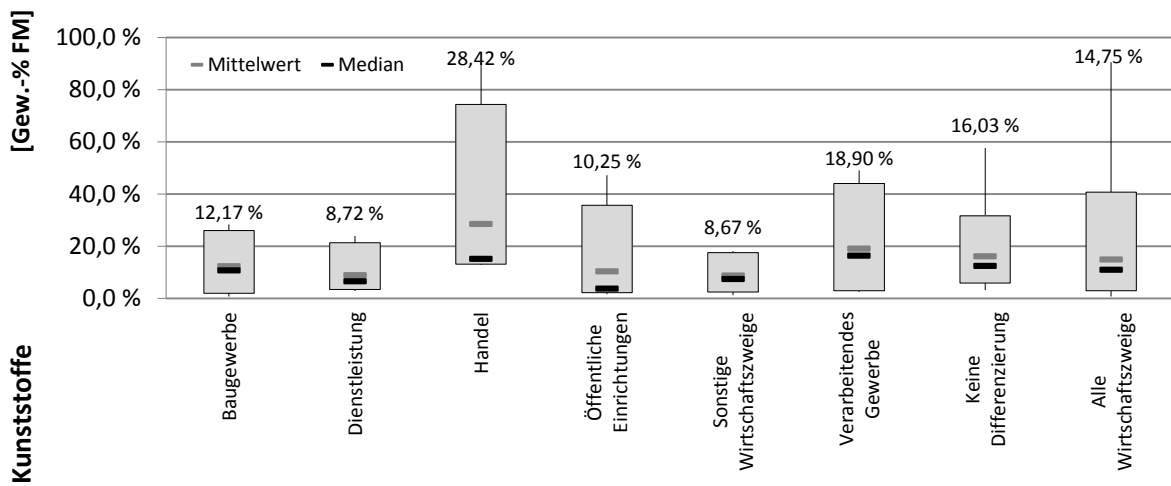


ABBILDUNG 83: KUNSTSTOFF-GEHALT IM GEWERBEABFALL NACH BRANCHEN

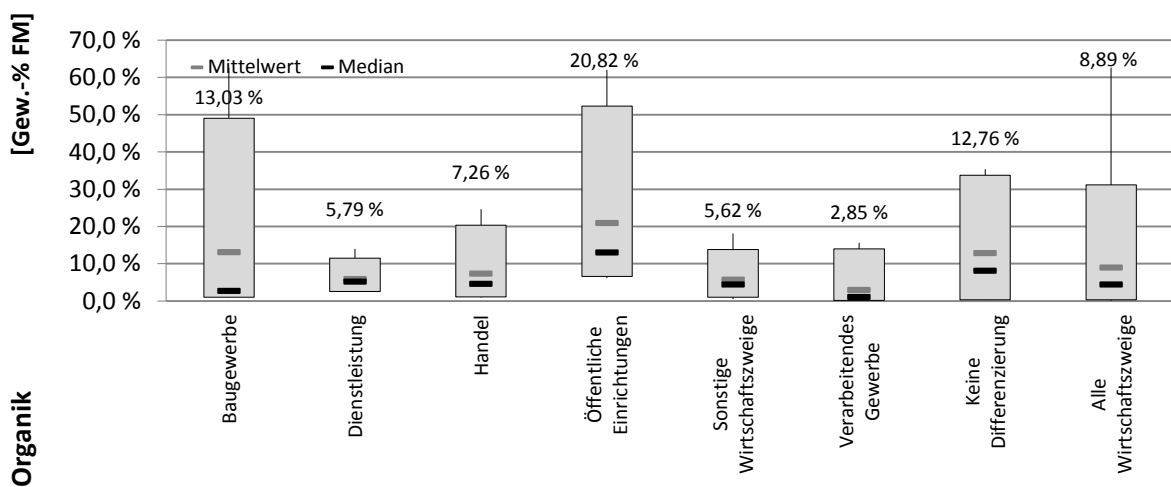


ABBILDUNG 84: ORGANIK-GEHALT IM GEWERBEABFALL NACH BRANCHEN

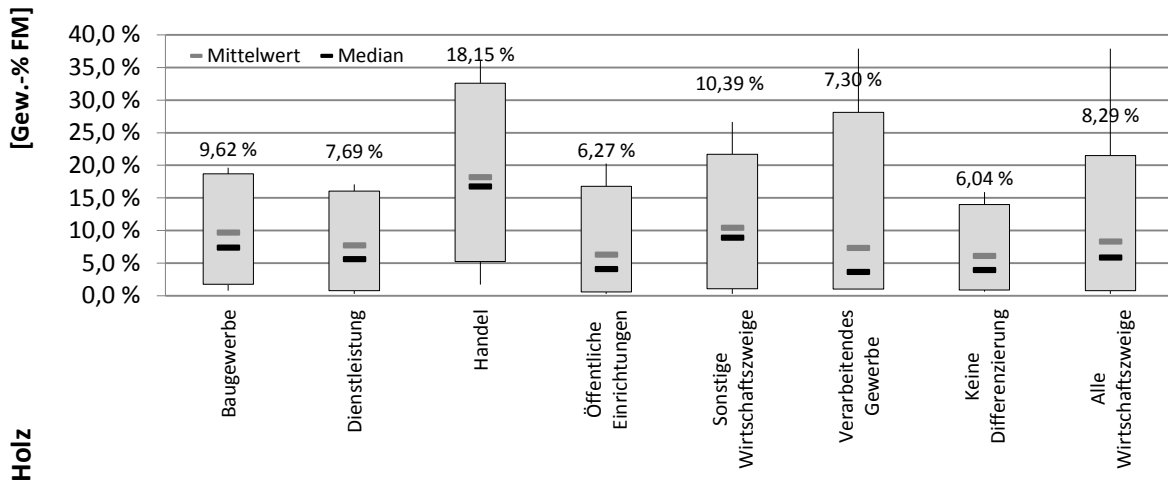


ABBILDUNG 85: HOLZ-GEHALT IM GEWERBEABFALL NACH BRANCHEN

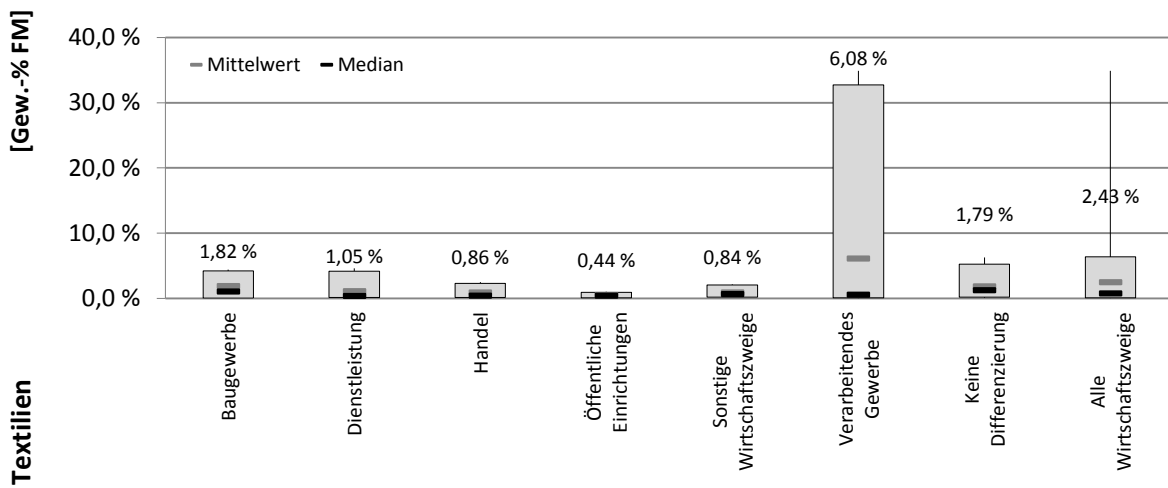


ABBILDUNG 86: TEXTILIEN-GEHALT IM GEWERBEABFALL NACH BRANCHEN

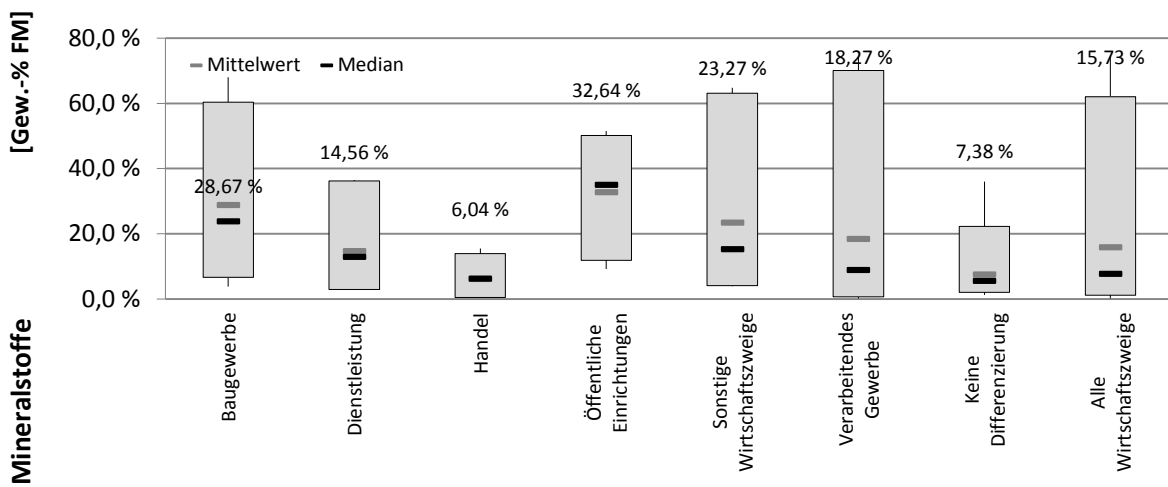


ABBILDUNG 87: MINERALSTOFF-GEHALT IM GEWERBEABFALL NACH BRANCHEN

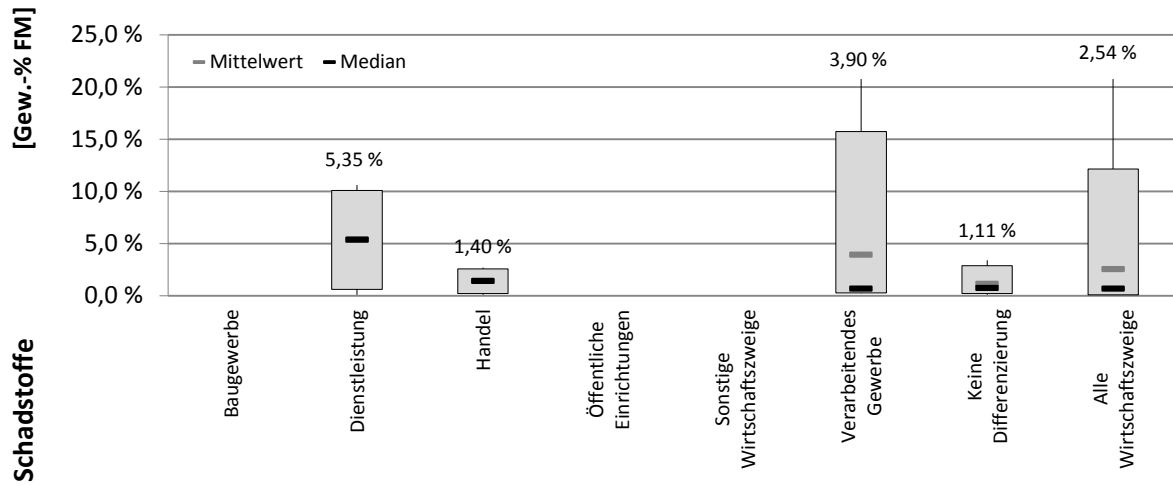


ABBILDUNG 88: SCHADSTOFF-GEHALT IM GEWERBEABFALL NACH BRANCHEN

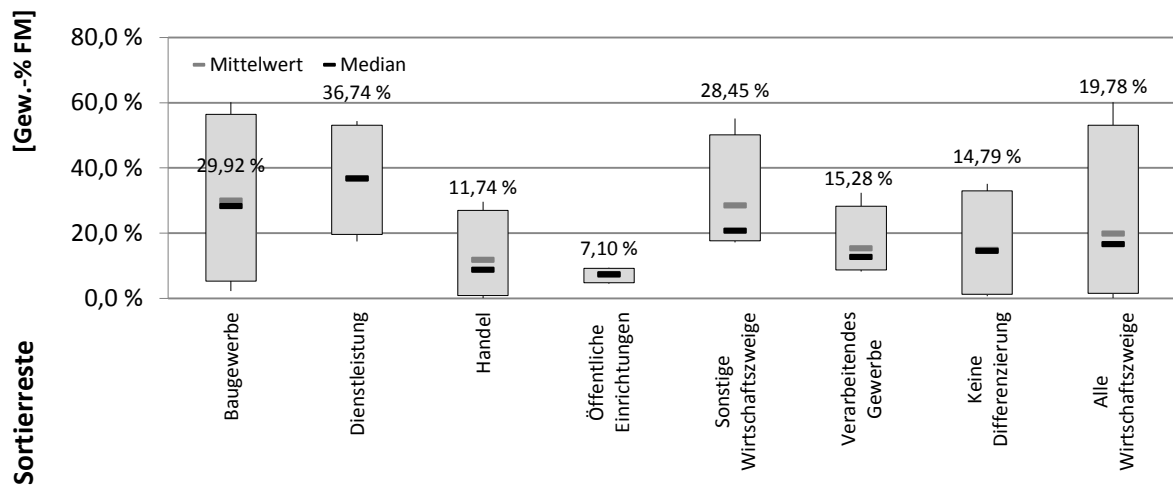


ABBILDUNG 89: GEHALT AN SORTIERRESTEN IM GEWERBEABFALL NACH BRANCHEN

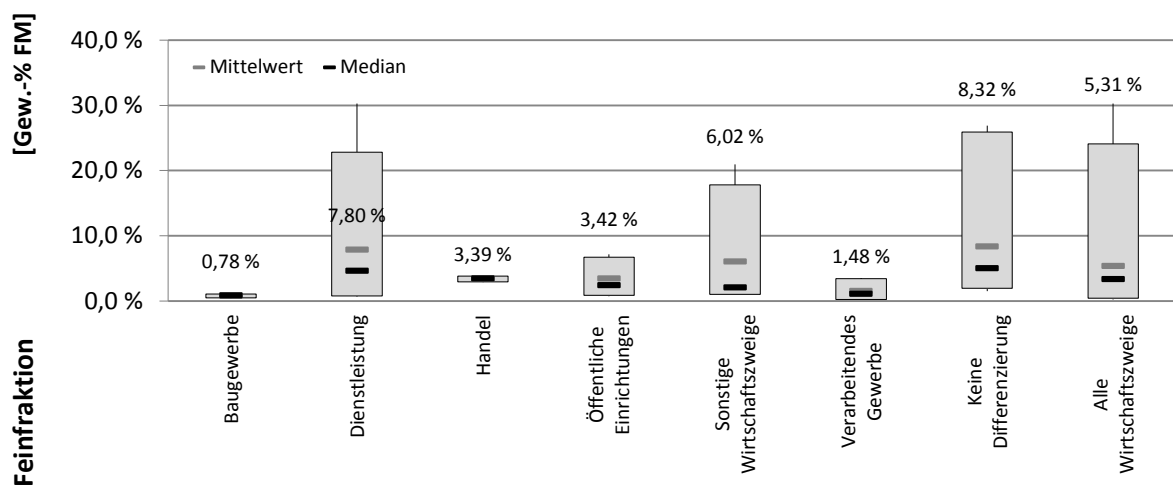


ABBILDUNG 90: GEHALT AN FEINMATERIAL IM GEWERBEABFALL NACH BRANCHEN

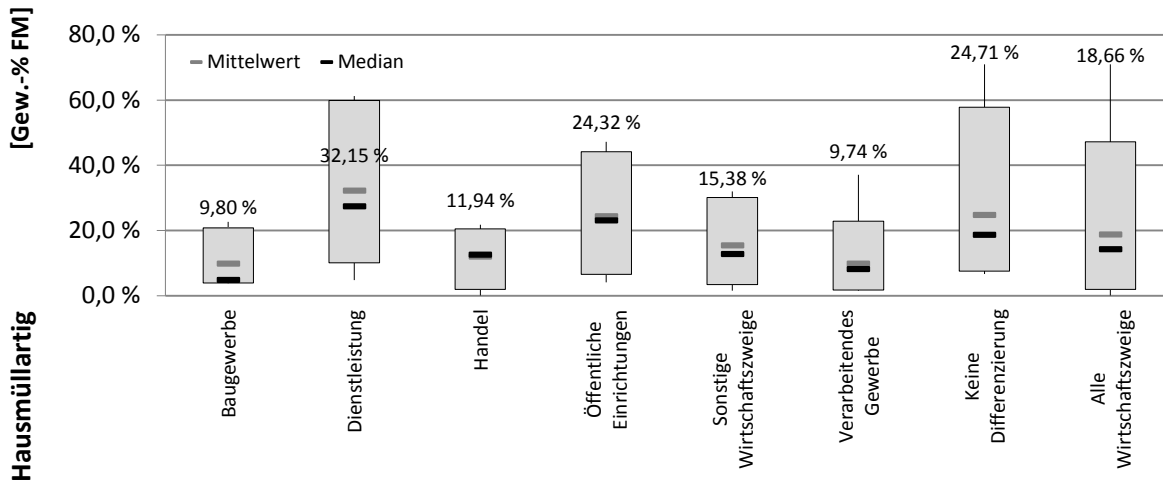


ABBILDUNG 91: GEHALT AN HAUSMÜLLARTIGEN MATERIALIEN IM GEWERBEABFALL NACH BRANCHEN

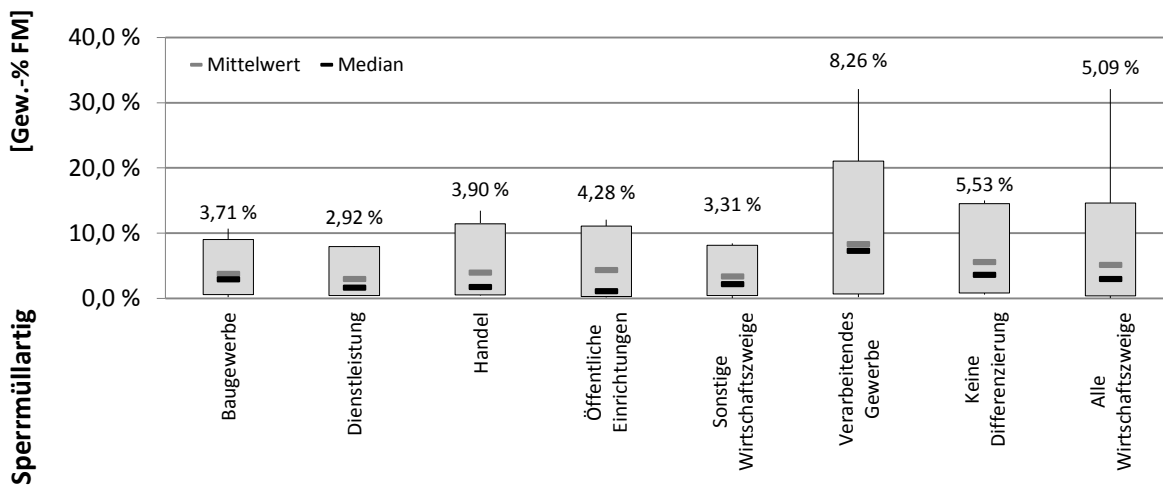


ABBILDUNG 92: GEHALT AN SPERRMÜLLARTIGEN MATERIALIEN IM GEWERBEABFALL NACH BRANCHEN

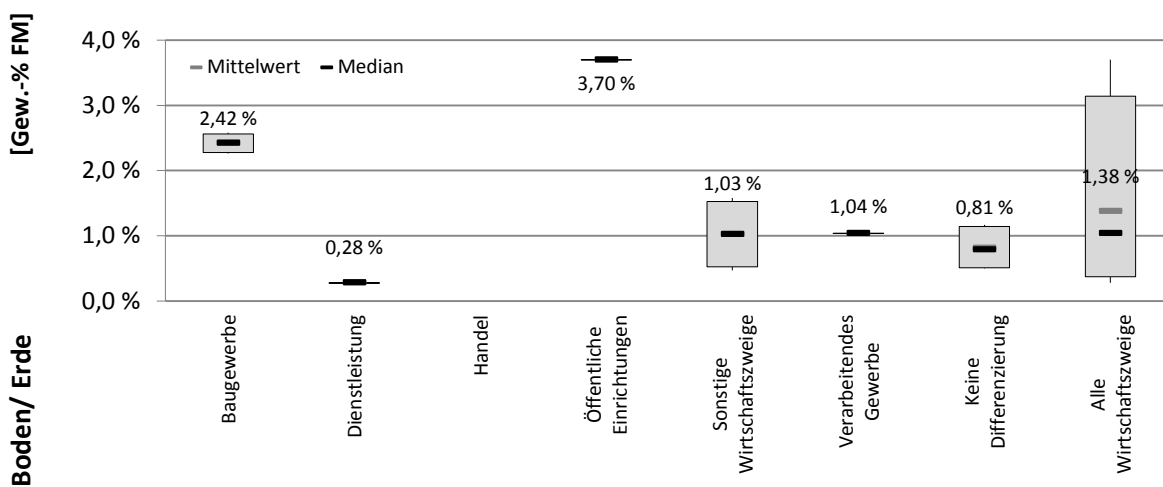


ABBILDUNG 93: GEHALT AN BODEN UND ERDE IM GEWERBEABFALL NACH BRANCHEN

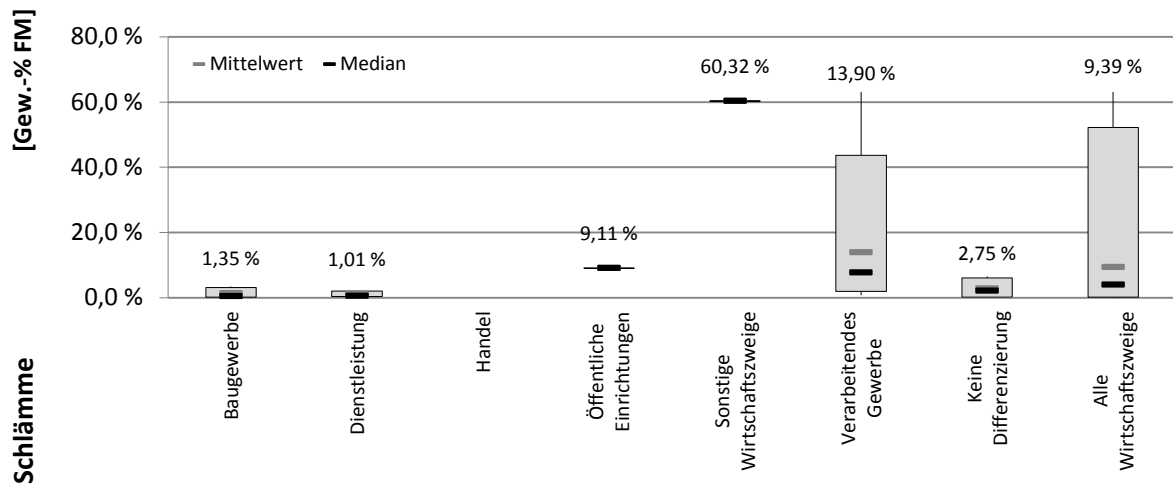


ABBILDUNG 94: GEHALT AN SCHLÄMMEN IM GEWERBEABFALL NACH BRANCHEN

Aufgrund des vergleichsweise hohen Anteils textilverarbeitender Gewerbebetriebe im Einzugsgebiet der Kreismülldeponie Hechingen ist die separate Betrachtung dieser Branche notwendig. Im Rahmen der bundesweiten Gewerbeabfalluntersuchung im Auftrag des Umweltbundesamtes ermittelte MÜLLER ET AL. [1994] für die Textilbranche nachfolgende Abfallzusammensetzung.

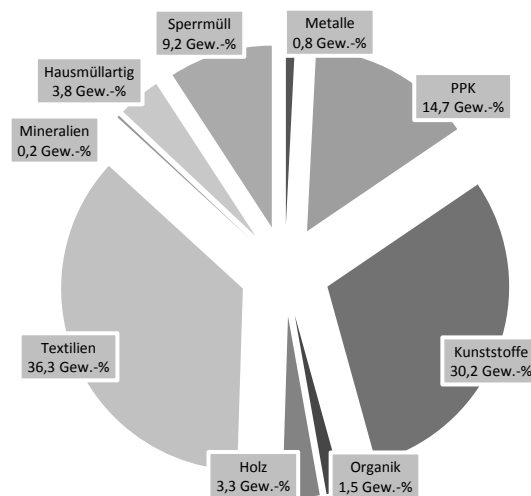


ABBILDUNG 95: ZUSAMMENSETZUNG VON GEWERBEABFÄLLEN DES TEXTIL- UND BEKLEIDUNGSGEWERBES [MÜLLER ET AL., 1994]

Wie zu erwarten ist, stellen Textilabfälle mit ca. 36 Gew.-% den höchsten Anteil dar. Daneben treten größere Anteile Kunststoffe und PPK in den Vordergrund.

Aufgrund unzureichender Datengrundlage ist in diesem Fall keine Betrachtung der Variationsbreite möglich.

Zusammenfassend sind die Ergebnisse der Gewerbeabfallanalyse dem Anhang 59 zu entnehmen.

5.2.3.3 SPERRMÜLLZUSAMMENSETZUNG

Sperrmüll steht für sperrigen Unrat, der aufgrund seiner Größe nicht in die Behälter der normalen Hausmüllabfuhr passt und getrennt gesammelt sowie abtransportiert wird. Als Sperrmüll gelten Möbel, Matratzen, Teppiche, Einrichtungsgegenstände, größeres Spielzeug und Fahrräder. Die Zusammensetzung des Sperrmülls ist jedoch sehr heterogen und wird im Wesentlichen durch die Art der Sammlung (bspw. Straßensammlung, Sammlung auf Abruf, Sammlung bei zentralen Sammelstellen), die zur Verfügung stehende Hausmüllbehältergröße sowie durch rechtliche Bestimmungen wie die kommunale Abfallsatzung bestimmt. Dominierende Stoffgruppen im Sperrmüll sind Holz, Metalle, Kunststoffe und zunehmend auch Verbundmaterialien [BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2011B].

Insgesamt finden sich in der Literatur nur wenige Untersuchungen zur Zusammensetzung von Sperrmüll. Aufgrund der mangelnden Datengrundlage ist es im Bereich des Sperrmülls nicht möglich, zeitspezifische Variationen der Zusammensetzung darzustellen. Für die Abschätzung des theoretischen Ressourcenpotenzials wird daher Abbildung 96 herangezogen, die einen zusammenfassenden Überblick der Zusammensetzung darstellt.

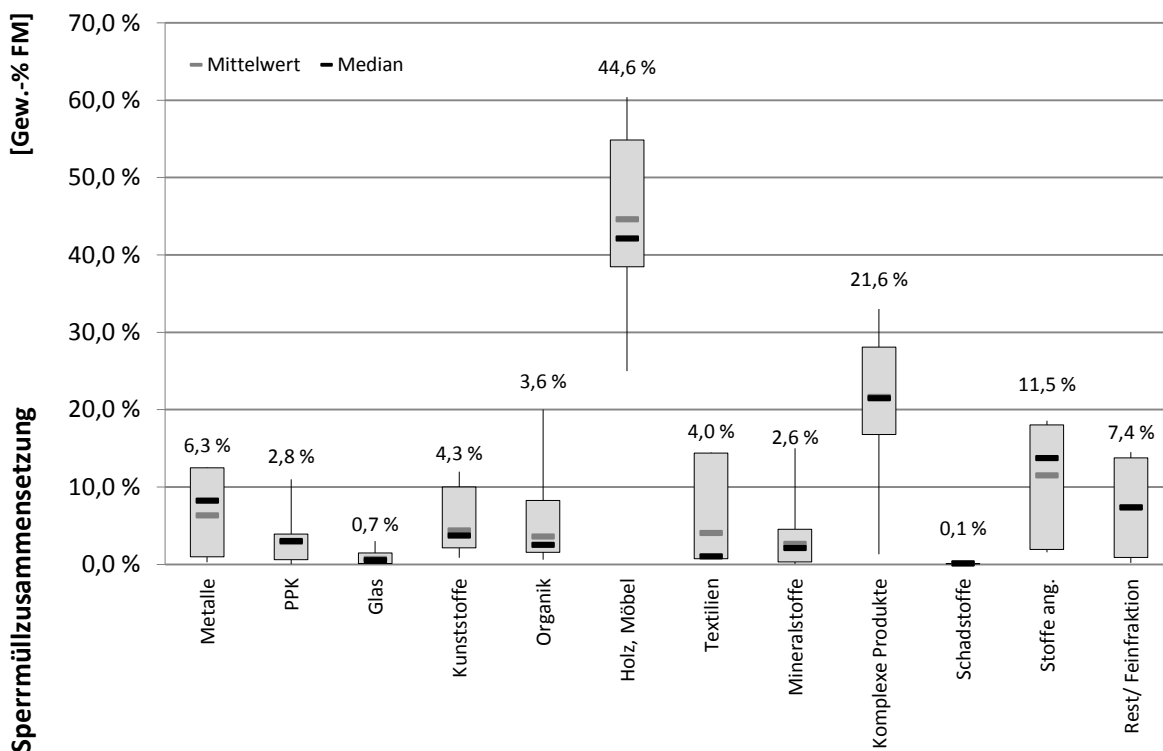


ABBILDUNG 96: ZUSAMMENFASSENDER ÜBERBLICK ZUR ZUSAMMENSETZUNG VON SPERRMÜLL

Wie bereits der Literatur zu entnehmen ist, sind auch bei dieser eigenen Aufstellung Hölzer bzw. Möbel mit durchschnittlich 45 Gew.-% FM die dominierende Fraktion des Sperrmülls. Daneben treten im Mittel mit ca. 21 Gew.-% FM komplexe Produkte, Stoffe ang. mit ca. 11 Gew.-% FM und Metalle mit ca. 6 Gew.-% FM als nächst größere Stoffanteile auf. Die genaue Variation der einzelnen Stoffgruppen ist dem Anhang 60 zu entnehmen.

5.2.3.4 BAUSCHUTTZUSAMMENSETZUNG

Eigene Untersuchungen – auf Basis einer aufgebauten Datenbank zur Bauschuttzusammensetzung - zur zeitspezifischen Zusammensetzung von Bauschutt zeigen keine eindeutigen Trendentwicklungen. Vielmehr bewegen sich diese über den gesamten Zeitraum auf einem einheitlichen Niveau, sodass an dieser Stelle auf eine Differenzierung verzichtet werden kann.

Aus Abbildung 97 wird ersichtlich, dass die Ablagerung von Bauschutt einen wesentlichen Beitrag zur Anreicherung von Mineralien im Deponiekörper beiträgt. Neben diesen treten, mit ca. 20 Gew.-% der FM, hausmüllartige Abfälle in den Vordergrund. Die übrigen Stofffraktionen sind lediglich in Bereichen von 2 – 8 Gew.-% der FM vorzufinden.

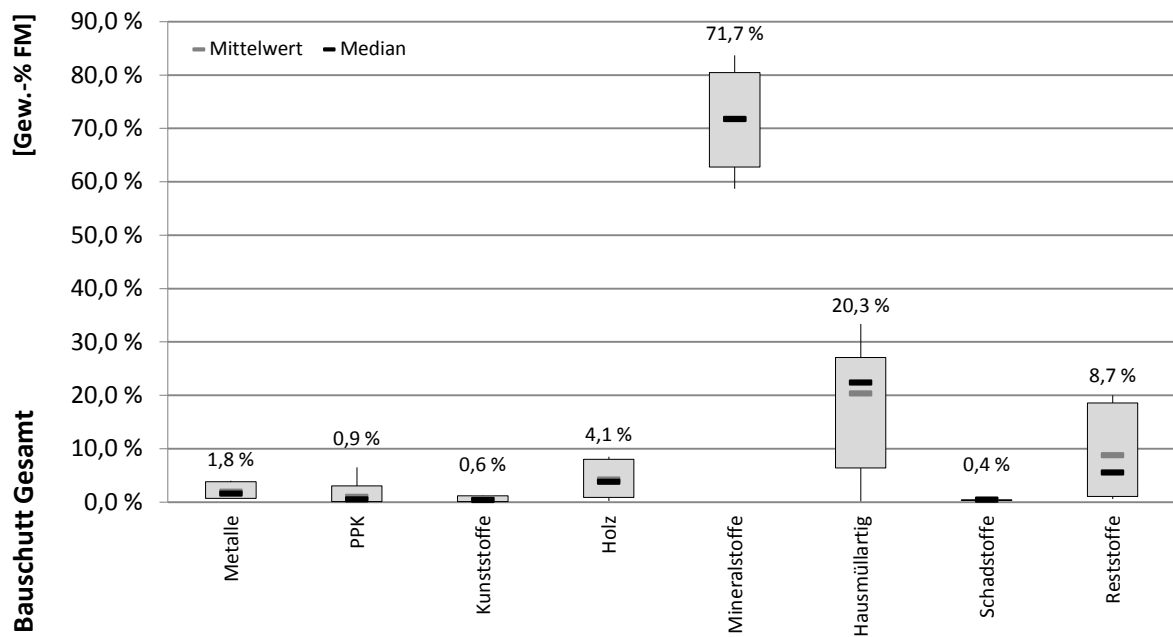


ABBILDUNG 97: GESAMTBETRACHTUNG ZUR STOFFLICHEN ZUSAMMENSETZUNG VON BAUSCHUTT

5.2.3.5 THEORETISCHE POTENZIALANALYSE

Die Kombination der spezifischen Zusammensetzung der betrachteten Abfallarten ermöglicht in Verbindung mit den abgeleiteten Ablagerungsmengen die Modellierung des theoretischen Ressourcenpotenzials der Kreismülldeponie Hechingen. Hierbei muss die Variation der Ablagerungsmenge und der Abfallzusammensetzung berücksichtigt werden. Zudem spielen der Abbau der organischen Substanz sowie der Wassergehalt der Stofffraktionen eine wesentliche Rolle.

VARIATION DER ABLAGERUNGSMENGE

Bei gleichbleibender mittlerer Zusammensetzung der Abfallarten und Variation der Ablagerungsmengen innerhalb der Szenarien MIN, MW und MAX ergibt sich das in Abbildung 98 aufgezeigte Ablagerungspotenzial auf der Kreismülldeponie Hechingen.

Hierbei stellen Mineralstoffe, Sortierreste, die Feinfraktion und organische Abfallbestandteile mit im Mittel ca. 1,1 Mio. Mg FM also etwa 50 Gew.-% FM die Hauptablagerungsmenge dar. Im Bereich von jeweils 150.000 bis 210.000 Mg FM sind Kunststoffe, Schlämme und PPK in Anteilen von 7 bis 10 Gew.-% FM auf die Kreismülldeponie Hechingen verbracht worden. Vergleichbar kann auch der Anteil deponierter Hölzer eingeschätzt werden, der ca. 114.000 Mg FM bzw. 5 Gew.-% der Gesamtablagerungsmasse beträgt. Glas, kompl. Produkte und Stoffe ang. sind mit Mengen von bis zu 84.000 Mg der FM auf den Deponiekörper verbracht worden. Die mittlere Verfrachtung von Textilien und Metallen kann auf 48.000 bis 58.000 Mg FM geschätzt werden. Hierneben treten Schadstoffe und Verpackungen in Größenordnungen von 21.000 bis 24.000 Mg FM auf.

Insgesamt ergibt sich, dass Mineralstoffe die vorherrschende Stofffraktion darstellen. Diese Aussage muss jedoch relativiert werden, da im Rahmen der theoretischen Abschätzung Materialien zur Profilierung und Rekultivierung des Deponiekörpers sowie Sande ebenfalls dieser Fraktion angerechnet werden. In Ablagerungsprotokollen ausgewiesene Rekultivierungsmaterialien machen im Mittel ca. 113.000 Mg der FM aus und sind aus technischen Gründen oberflächennah aufgebracht. Eine frühzeitige Separation dieser Fraktion erscheint daher möglich und sinnvoll, um den nachgeschalteten Aufbereitungs- sowie Sortierprozess zu entlasten. Eine stoffliche Verwertung dieser Materialien auf Basis der vorherigen Funktionalität ist zudem denkbar. Das mittlere Vorkommen an Sanden kann auf ca. 58.000 Mg der FM geschätzt werden, wobei in diesem Fall keine oberflächennahe Aufbringung zu vermuten ist.

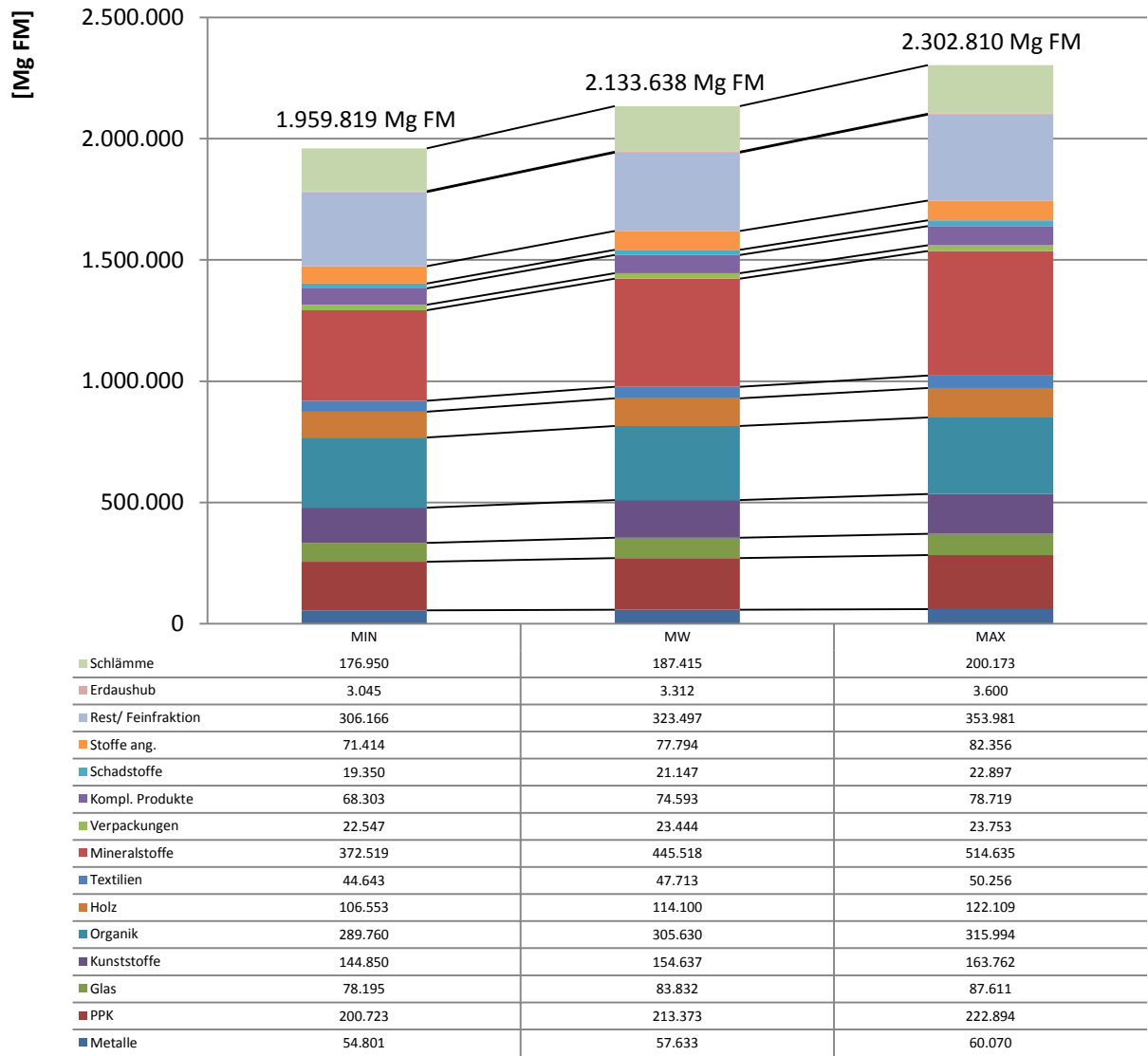


ABBILDUNG 98: AUSWIRKUNG DER VARIATION DER ABLAGERUNGSMENGE (MIN, MW, MAX) AUF DIE ROHSTOFFPOTENZIALERMITTLUNG | GESAMTBETRACHTUNG THEORIE (VERGL. ANHANG 61)

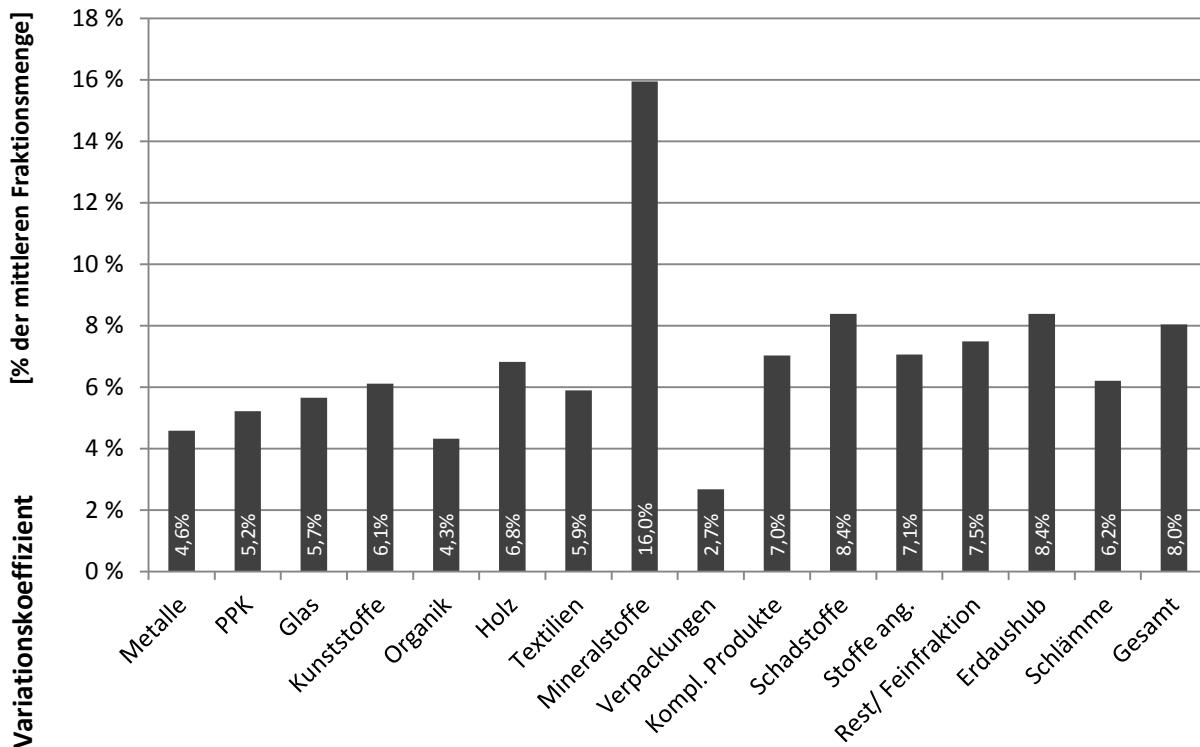


ABBILDUNG 99: VARIATIONSKOEFFIZIENT DER ABGELAGERTEN STOFFFRAKTIONEN UNTER BETRACHTUNG DER MITTLEREN STOFFSPEZIFISCHEN GESAMTABLAGERUNGSMENGE | VARIATION ABLAGERUNGSMENGE THEORIE

Auffällig hohe Variationen der betrachteten Szenarien von ca. 16 % treten ausschließlich im Bereich der Mineralstoffe auf. Diese sind darauf zurück zu führen, dass hier bereits bei Betrachtung der Ablagerungsmengen größere Abweichungen auftreten.

Mit Werten von 2,7 bis 8,4 % bewegen sich die massenbezogenen Ablagerungsmengen der übrigen Stofffraktionen hingegen in einem niedrigen Bereich (Abbildung 99).

Zusammenfassend ergibt sich, dass sich die Variationen der abfallartenspezifischen Ablagerungsmengen überwiegend auf die Fraktion der Mineralstoffe auswirken.

VARIATION DER ABFALLZUSAMMENSETZUNG

Unter Annahme minimaler und maximaler Anteile ($Kl_{95\%}$) der einzelnen Stofffraktionen ergeben sich aus methodischer Sicht folgende Gegebenheiten:

- Bei Annahme minimaler und maximaler Anteile (Betrachtung des $Kl_{95\%}$) der Stofffraktionen wird die ursprünglich abgeschätzte Gesamtablagerungsmenge unter- oder überschätzt.
- Zur Minimierung dieser Fehlabschätzung wird im Rahmen der Analysen ausschließlich auf die modellierte mittlere Gesamtablagerungsmenge zurückgegriffen (Szenario MW).
- Die vergleichende Gegenüberstellung der hieraus berechneten Ablagerungsmengen zu den Szenarien MIN und MAX erlauben die Bewertung der gewonnenen Erkenntnisse.

Die Abbildungen 100 und 101 machen deutlich, dass bei Berücksichtigung des $Kl_{95\%}$ der Sortieranalysen deutliche Mengenunterschiede der Gesamtablagerungs- und Stofffraktionsmenge auftreten.

Die Interpretation der Ergebnisse muss in diesem Fall also in Abhängigkeit der Stofffraktionen gesehen werden. So kann bspw. festgehalten werden, dass im Laufe der Ablagerungsphase mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % ca. 31.000 bis 108.000 Mg FM Metalle auf die Kreismülldeponie Hechingen verbracht wurden. Für die übrigen Stofffraktionen gelten in diesem Zusammenhang die in Abbildung 100 und 101 aufgezeigten Werte sowie Variationen.

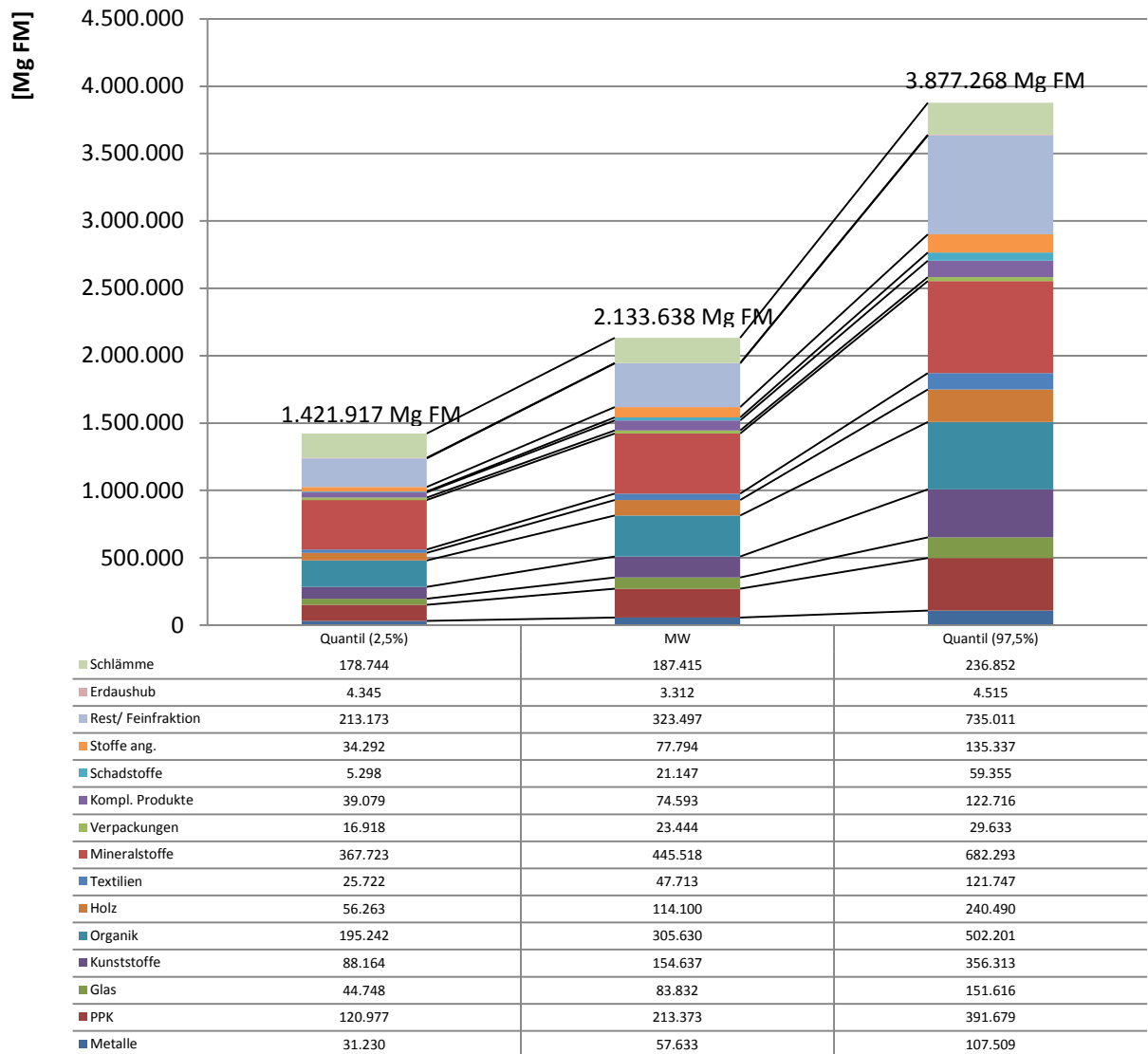


ABBILDUNG 100: AUSWIRKUNG DER VARIATION DER ABFALLZUSAMMENSETZUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER MITTLEREN GESAMTABLAGERUNGSMENGE | GESAMTBETRACHTUNG THEORIE (VERGL. ANHANG 63)

Wie deutlich wird, bewirkt die Variation der Abfallzusammensetzung deutlich stärkere Unterschiede der modellierten Ablagerungsmengen. Diese bewegen sich mit Werten von 17 bis 131 % auf einem sehr hohen Niveau (Abbildung 101). Dies gilt vor allem für Schadstoffe und Textilien, die Abweichungen von über 100 % zum prognostizierten mittleren Mengenaufkommen aufweisen.

In Bezug zu den Ergebnissen der Variation der Ablagerungsmengen kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass sich Änderungen im Rahmen der Definition spezifischer Abfallzusammensetzungen deutlich stärker auf die theoretische Potenzialanalyse auswirken.

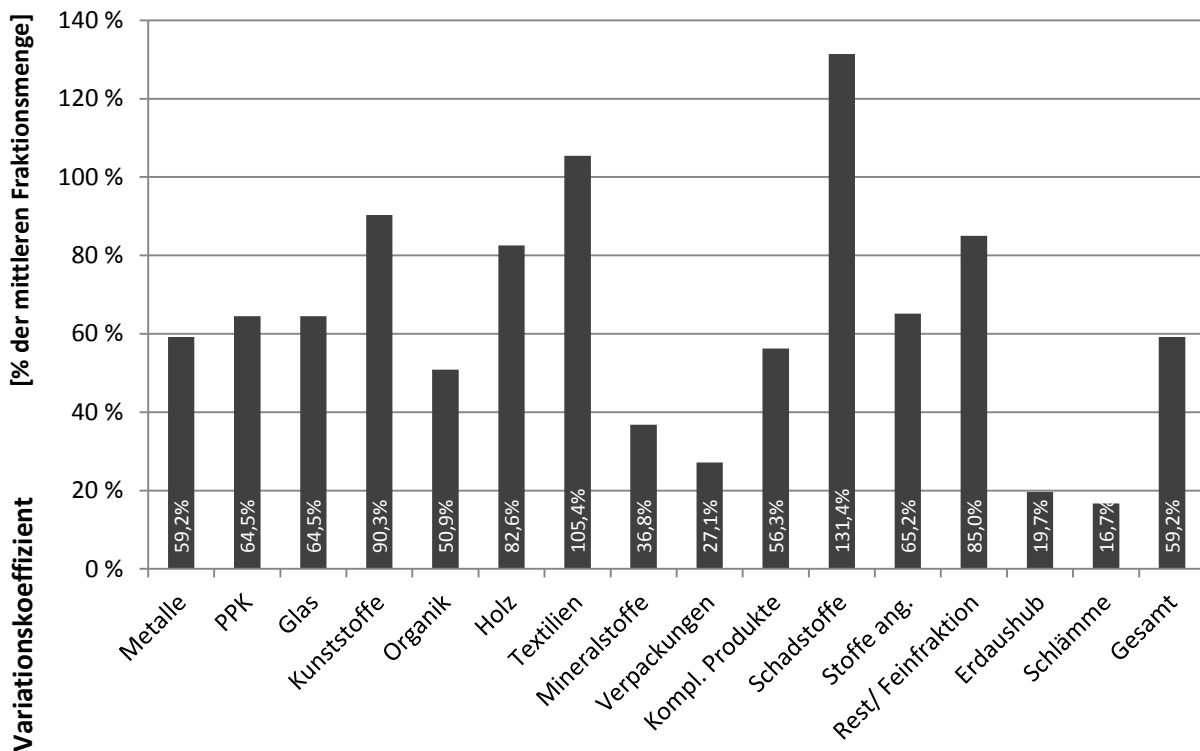


ABBILDUNG 101: VARIATIONSKOEFFIZIENT DER ABGELAGERTEN STOFFFRAKTIONEN UNTER BETRACHTUNG DER MITTLEREN STOFFSPEZIFISCHEN GESAMTABLAGERUNGSMENGE | VARIATION ABFALLZUSAMMENSETZUNG THEORIE

Aufgrund der Tatsache, dass zur Modellierung regionalspezifischer Abfallzusammensetzungen nur unzureichende Daten vorliegen, stellt im Rahmen dieser Betrachtung Ablagerungsszenario MW bei gleichzeitig mittlerer Abfallzusammensetzung die wahrscheinlichste Variante dar.

Unter Berücksichtigung des aufgezeigten Abbaus der organischen Substanz ergibt sich das in Abbildung 102 dargestellte Rohstoffpotenzial. Hierbei werden die ermittelten Reduktionen der organischen Substanz unter Beachtung des mittleren Gesamtaufkommens den leicht abbaubaren Stofffraktionen PPK, Organik und Schlämme angerechnet. Schwer abbaubare Stoffe wie bspw. Holz werden im Rahmen der Untersuchung nicht berücksichtigt.

Es zeigt sich, dass unter diesen Annahmen im Laufe der Jahre etwa 73.000 Mg FM PPK, 106.000 Mg FM Organik und 65.000 Mg FM Schlamm abgebaut wurden. Ihr aktuelles Aufkommen kann somit auf 140.000, 200.000 und 123.000 Mg FM geschätzt werden. Bis zum Jahr 2050 würde eine weitere Reduzierung stattfinden, sodass zu diesem Zeitpunkt Mengen von 90.000, 130.00 und 79.000 Mg FM vorliegen würden.

Neben dem Abbau der organischen Substanz ist der stoffspezifische Wassergehalt eine entscheidende Größe zur Beurteilung des Rohstoffpotenzials einer Deponie. Hierbei ist zu beachten, dass Materialien mit vergleichsweise geringem Wasseraufnahmevermögen wie bspw. Metalle und Glas eine geringe Mengenreduzierung aufzeigen. Entsprechend steigen ihre prozentualen Anteile bei Betrachtung der Gesamtzusammensetzung.

Im Umkehrschluss reduzieren sich vor allem die Mengen und Anteile gut wasserspeichernder Stoffe. Der Vergleich der Abbildung 102 und 103 verdeutlicht, was dies für das theoretische Rohstoffpotenzial der Kreismülldeponie Hechingen bedeutet.

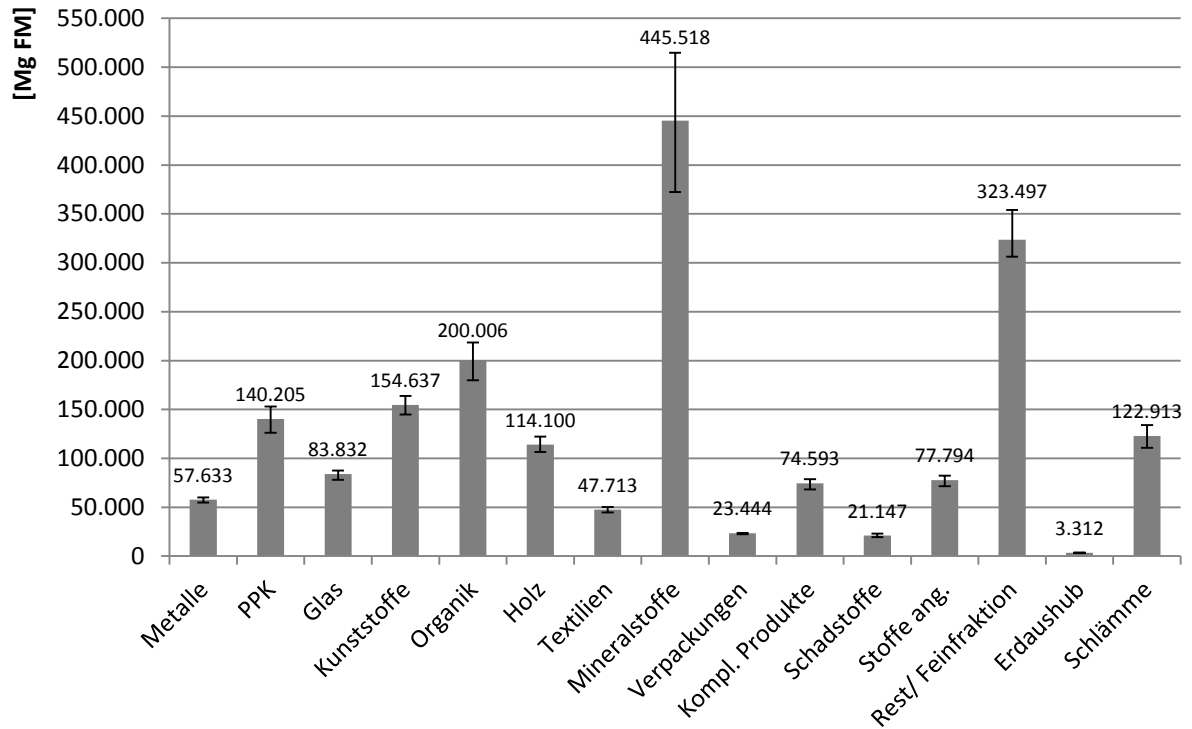


ABBILDUNG 102: THEORETISCHES ROHSTOFFPOTENZIAL DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DES ABBAUS DER ORGANISCHEN SUBSTANZ (AUSGANGSMASSE: 2.133.638 MG WOVON 243.293 MG ORGANISCHE SUBSTANZ ABGEBAUT WURDEN – VERGL. ANHANG 65)

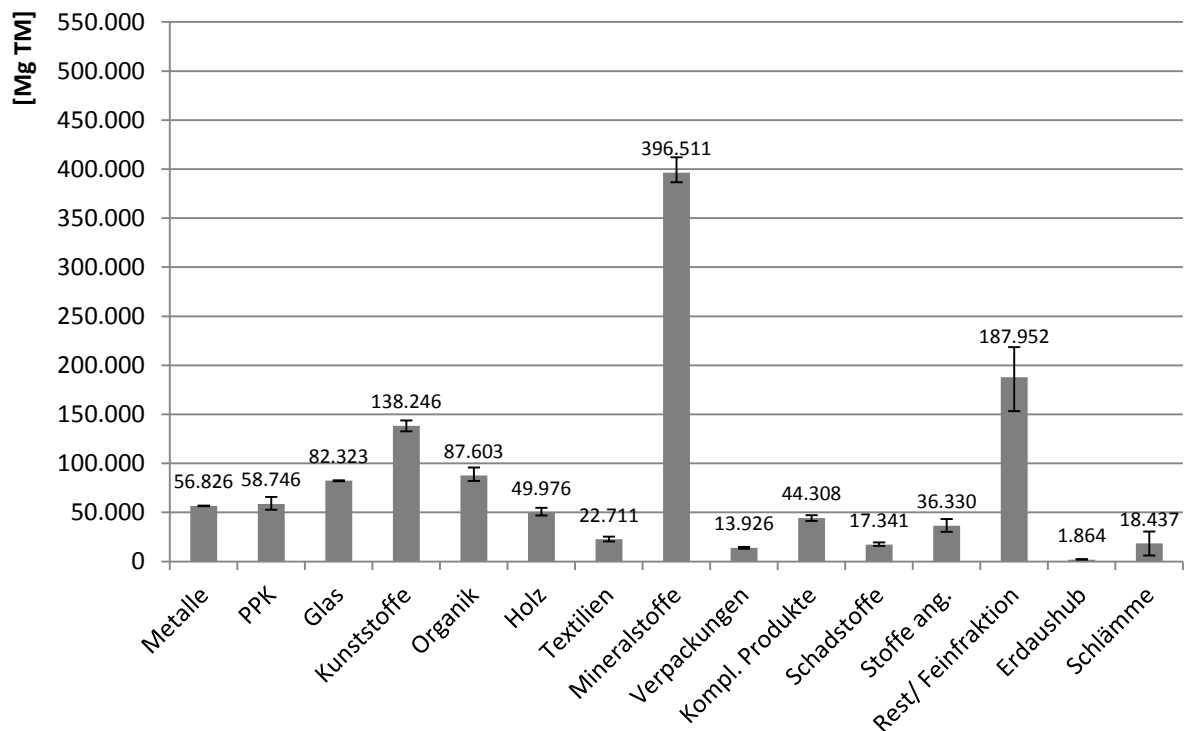


ABBILDUNG 103: THEORETISCHES ROHSTOFFPOTENZIAL DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DES ABBAUS DER ORGANISCHEN SUBSTANZ UND STOFFSPEZIFISCHER WASSERGEHALTE (AUSGANGSMASSE: 2.133.638 MG WOVON 243.293 MG ORGANISCHE SUBSTANZ ABGEBAUT WURDEN UND 677.244 MG WASSER ABZUZIEHEN SIND – VERGL. ANHANG 66)

Dominierende Stofffraktion sind in diesem Fall Mineralstoffe, die im Mittel zu ca. 397.000 Mg TM anfallen dürften. Ihr Anteil an der Gesamttrockenmasse kann mit 35 Gew.-% TM beziffert werden. Rest- und Feinfraktion sowie Kunststoffe bilden mit etwa 14 und 12 Gew.-% TM die nächst größeren Anteile. Absolut entspricht dies 188.000 und 138.000 Mg TM. Trotz des modellierten Abbaus der organischen Substanz sind Restmengen von ca. 88.000 Mg TM zu vermuten. Glas zeigt mit 82.000 Mg TM in diesem Zusammenhang ein ähnlich hohes Potenzial auf. Im Bereich von knapp 60.000 Mg TM bzw. 5 Gew.-% TM liegen die Fraktionen Metalle und PPK. In Größenordnungen von 35.000 bis 50.000 Mg TM sind neben Holz und komplexen Produkten auch Stoffe ang. angesiedelt. Die verbleibenden Stofffraktionen zeigen mit Ausnahme von reinem Erdaushub ein mittleres Potenzial von 13.000 bis 23.000 Mg TM. Erdaushub wird lediglich zu 2.000 Mg TM im Deponiekörper vermutet. Dieser könnte zudem den Mineralstoffen zugerechnet werden.

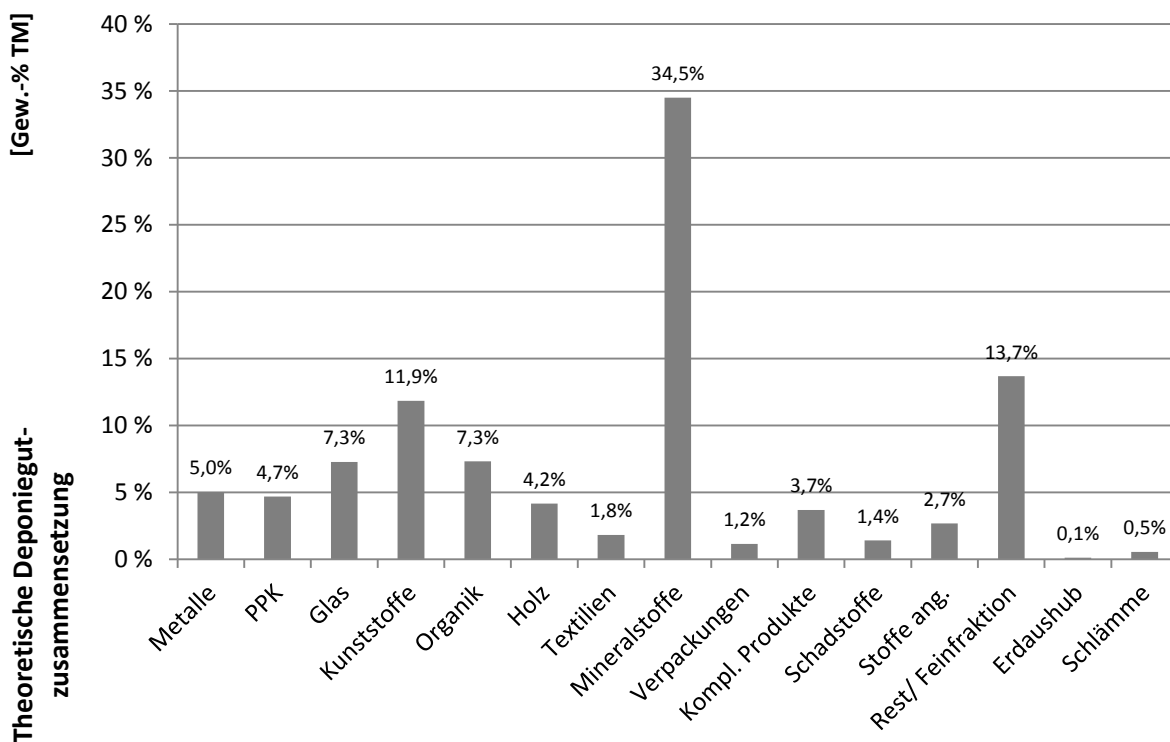


ABBILDUNG 104: THEORETISCHE ZUSAMMENSETZUNG DES DEPONIEGUTS UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DES ABBAUS DER ORGANISCHEN SUBSTANZ UND STOFFSPEZIFISCHER WASSERGEHALTE

5.2.4 REALES RESSOURCENPOTENZIAL

5.2.4.1 IN-SITU SORTIERUNG

Die nachfolgenden Ergebnisse zur in-situ Sortierung beziehen sich jeweils auf die FM des untersuchten Deponieguts. Zudem sind die Untersuchungen zur Zusammensetzung der Sortierreste bereits in den Darstellungen enthalten. Diese sind dem Anhang 67 und 68 zu entnehmen. Abbildung 105 verdeutlicht nochmals, dass die Feinfraktion etwa Zweidrittel des gesamten Deponiekörpers ausmacht. Den nächst größeren Anteil zeigt die Kunststofffraktion mit durchschnittlich ca. 11,0 Gew.-% der FM. Sortierreste > 35 mm, die im Wesentlichen aus kleineren Kunststofffolien, Textilfasern und organischen sowie mineralischen Anheftungen bestehen, folgen mit etwa 7,0 Gew.-% der FM. Mit ca. 6,0 Gew.-% FM machen Textilien im Vergleich zu ähnlichen Untersuchungen einen großen Anteil des Deponiekörpers aus. Dies resultiert aus der Tatsache, dass das Einzugsgebiet der Kreismülldeponie Hechingen stark durch Textilindustrie sowie textilverarbeitende Betriebe geprägt ist und war. Neben 4,0 Gew.-% der FM Mineralstoffe treten Fe-Metalle und Holz mit ca. 2,0 Gew.-% der FM in der Gesamtablagerungsmenge auf. Die übrigen Stofffraktionen sind zu unter einem Gew.-% FM zu vermuten. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass die wirtschaftlich verwertbaren NE-Metalle einen Anteil von etwa 0,5 Gew.-% ausmachen.

Insgesamt können die Abweichungen zwischen BI und BII als gering eingestuft werden. Lediglich für Mineralstoffe treten größere Unterschiede auf, die durch vorgefundene Monobereiche von Bauschutt im Bereich der Bohrstaffel II zu erklären sind.

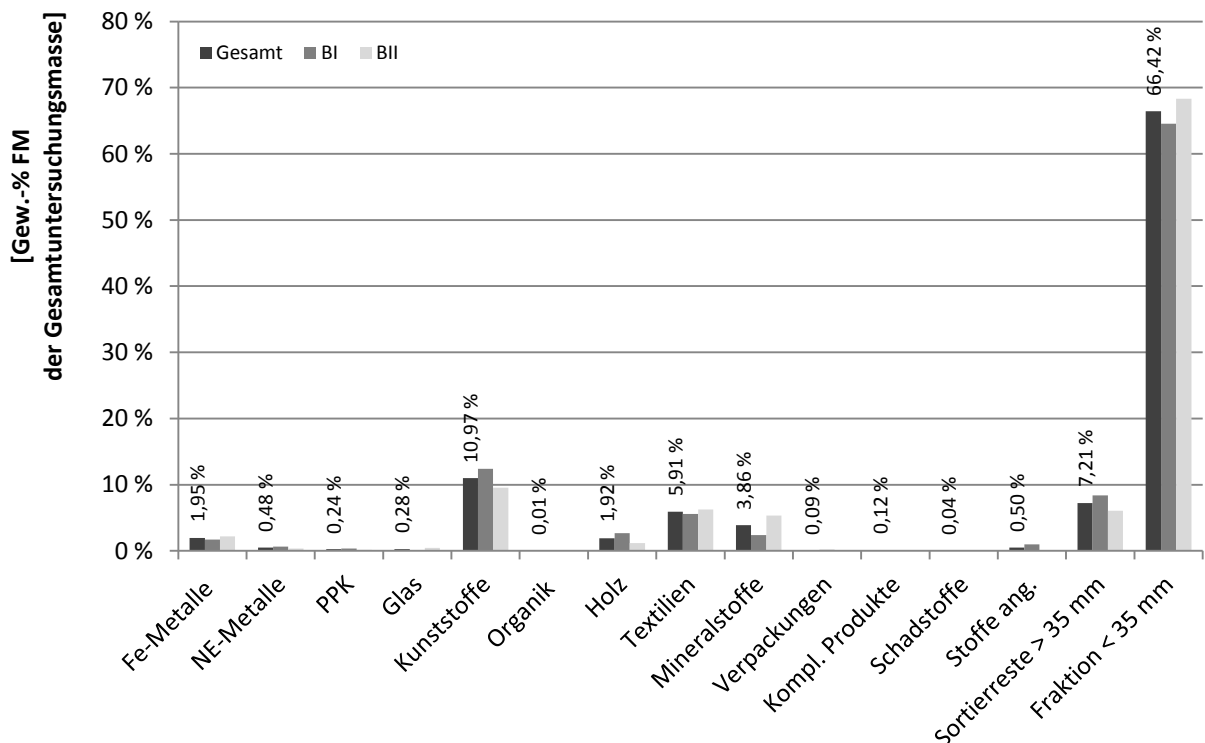


ABBILDUNG 105: DURCHSCHNITTICHE ZUSAMMENSETZUNG DES UNTERSUCHTEN DEPONIEGUTS IN BEZUG ZUR GESAMTEN UNTERSUCHUNGSMASSE UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER BOHRSTAFFELN I UND II (BI UND BII) SOWIE DEREN MITTELWERT (GESAMT) – VERGL. ANHANG 68

Unter Annahme, dass nach erfolgreicher Klassierung ausschließlich die Fraktion > 35 mm einer Sortierung unterzogen wird, ergeben sich die in Abbildung 106 dargestellten gewichtsbezogenen Fraktionsanteile. Der Vergleich beider Abbildungen macht deutlich, dass durch eine gezielte Klassierung eine prozentuale Anreicherung an Rohstoffen im Siebgut stattfindet. Die absolute Menge ändert sich jedoch nicht, wobei aufgrund geringerer Massenflüsse innerhalb des Sortierprozesses verbesserte Separierungsergebnisse erzielt werden können.

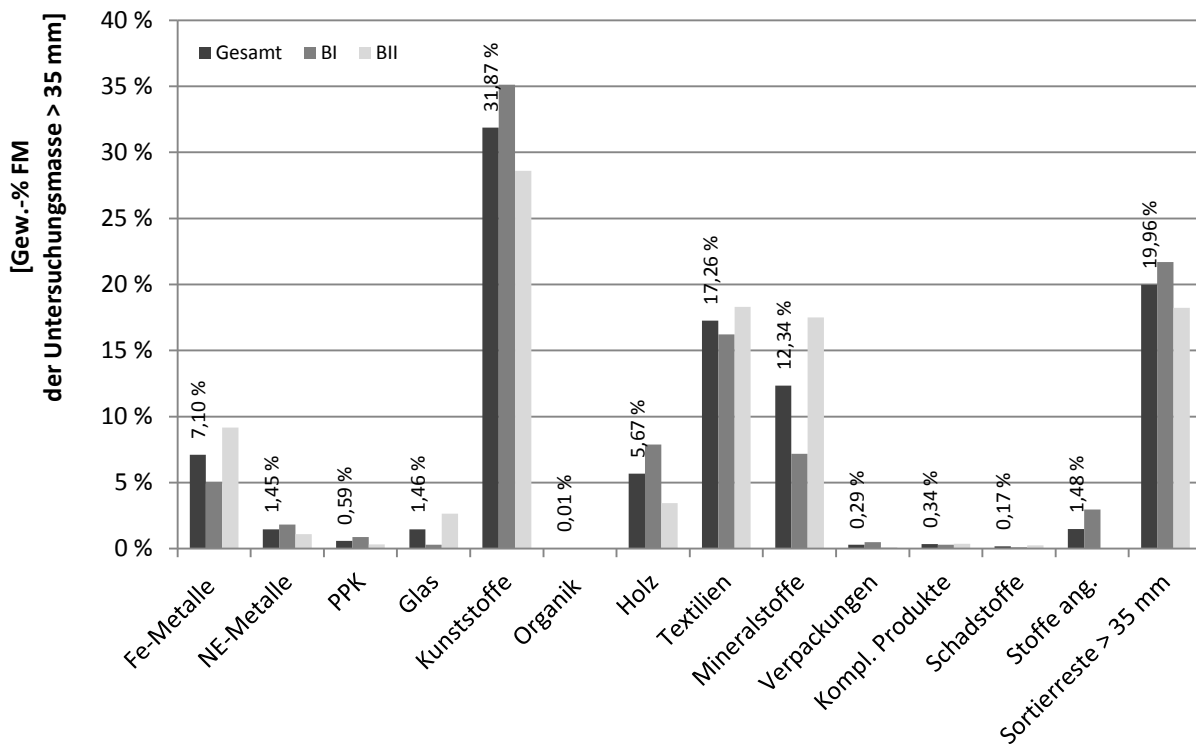


ABBILDUNG 106: DURCHSCHNITTliche ZUSAMMENSETZUNG DES UNTERSUCHTEN DEPONIEGUTS IN BEZUG ZUR UNTERSUCHUNGSMASSE > 35 MM UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER BOHRSTAFFELN I UND II (BI UND BII) SOWIE DEREN MITTELWERT (GESAMT)

Die mittleren Potenziale und deren im Rahmen der Sortierung vorgefundenen Variationsbreiten werden aus den Abbildungen 107 und 108 deutlich. Hierbei wird keine Differenzierung zwischen erster und zweiter Bohrstaffel vorgenommen, sodass kleinere Abweichungen zu den zuvor gezeigten Mittelwerten auftreten können.

Insgesamt zeigt sich, dass neben Kunststoffen auch Sortierreste, Mineralstoffe und Textilien einen vergleichsweise großen Schwankungsbereich besitzen. Die ökonomisch interessante Fraktion der Fe-Metalle konnte in jeder Deponiegutcharge nachgewiesen werden. Ihre Spannweite reicht dabei von ca. 0,5 bis 5,0 Gew.-% FM der Gesamtuntersuchungsmasse bzw. 1,1 bis 23,0 Gew.-% FM der Fraktionsmasse > 35 mm.

NE-Metalle treten in diesem Zusammenhang in maximalen Anteilen von bis zu 1,4 Gew.-% FM der Gesamtuntersuchungsmasse auf. Dies entspricht einem Anteil von etwa 4,1 Gew.-% FM der Fraktion > 35 mm.

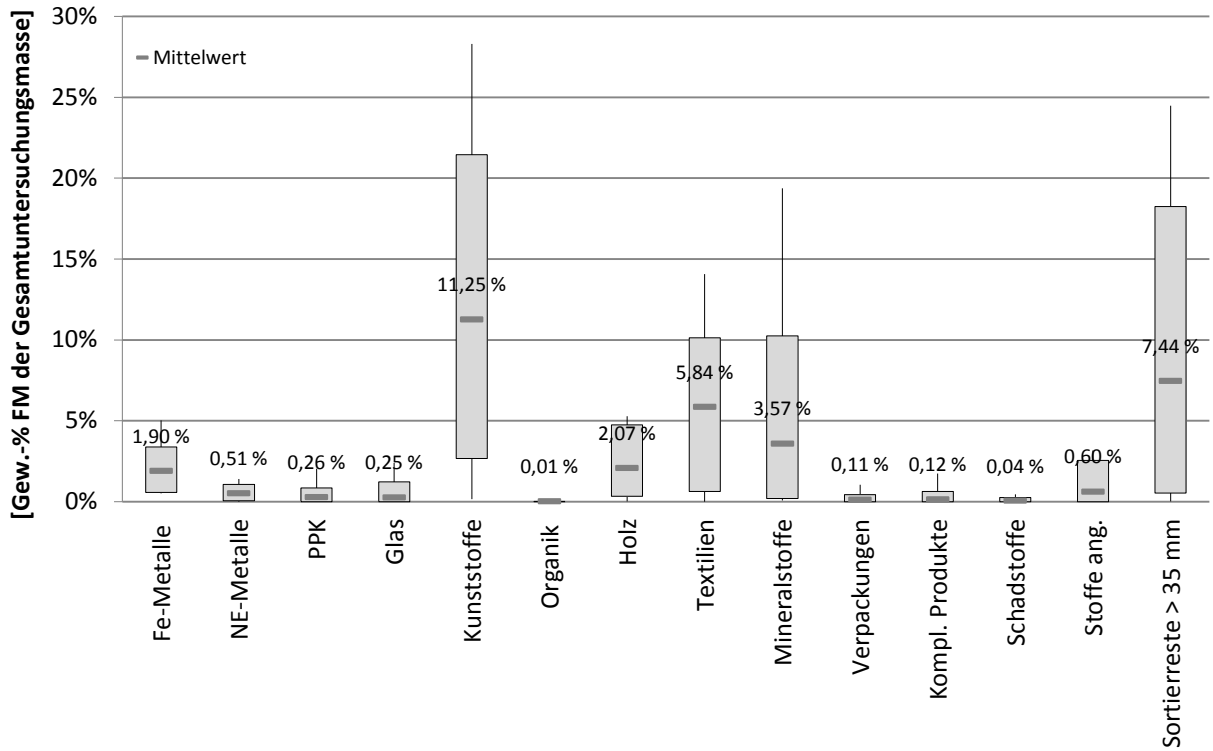


ABBILDUNG 107: SCHWANKUNGSBREITE DER STOFFFRAKTIONSANTEILE AN DER GESAMTUNTERSUCHUNGSMASSE | ALLE DEPONIEGUTCHARGEN BERÜCKSICHTIGT (ANHANG 68)

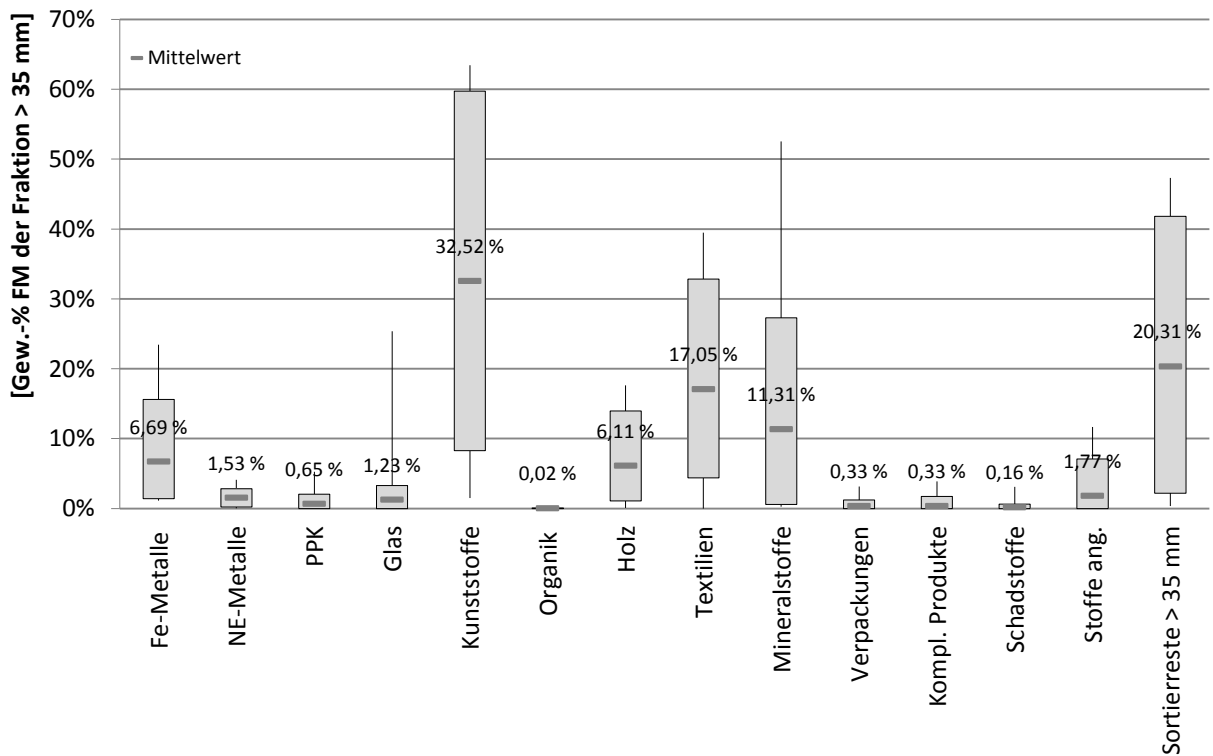


ABBILDUNG 108: SCHWANKUNGSBREITE DER STOFFFRAKTIONSANTEILE AN DER FRAKTION > 35 MM | ALLE DEPONIEGUTCHARGEN BERÜCKSICHTIGT

Wie für das theoretische Ressourcenpotenzial gezeigt, hat sich die Zusammensetzung unterschiedlicher Abfallarten im Laufe der Zeit verändert. In diesem Zusammenhang ist zu vermuten, dass sich dies auch im Rahmen der realen Ressourcenpotenzialermittlung widerspiegelt. Insgesamt deuten die zum Teil äußerst geringen Korrelationsmaße jedoch darauf hin, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Ablagerungsjahren und somit auch den Ablagerungstiefen existieren. Lediglich für die Stofffraktionen Holz, Verpackungen, Stoffe ang. und Sortierreste erreichen die Bestimmtheitsmaße Werte zwischen 26 und 43 % (siehe Anhang 69 bis 81).

Trotz mangelnder statistischer Absicherung, die es in weiteren Untersuchungen zu verbessern gilt, können folgende Tendenzen genannt werden:

- Fe-Metalle zeigen unabhängig vom Ablagerungsjahr der Abfälle im Mittel ein einheitliches Niveau, das bei ca. 2 Gew.-% der FM der Gesamtuntersuchungsmasse liegt.
- NE-Metalle besitzen eine leicht steigende Tendenz, die durch den mit den Jahren zunehmenden Einsatz dieser Metalle in der Elektro- und Unterhaltungstechnik zu erklären ist.
- PPK, die ohnehin ausschließlich in sehr geringen Mengen vorgefunden wurden, verzeichnen hingegen einen anteilmäßigen Rückgang im Verlauf der Ablagerungsphase.
- Gleiches gilt für die Fraktionen Glas, Kunststoffe, Holz, Verpackungen, kompl. Produkte und Schadstoffe, wobei in allen Fällen die Einführung getrennter Sammelsysteme ursächlich sein könnte.
- Wie bereits die Fe-Metalle besitzen die Fraktionen Mineralstoffe und Textilien über den gesamten Zeitraum bzw. in den einzelnen Tiefenregionen ein eher einheitliches Niveau.
- Der Anteil der Fraktion Sortierreste nimmt vom Beginn bis zum Ende der Abfallablagerung deutlich ab. Dies könnte daraus resultieren, dass biochemische Prozesse noch in den Anfangsstadien sind und so eine bessere Identifizierung der Materialien möglich ist.
- Stoffe ang. zeigen hingegen einen entgegengesetzten Verlauf an, der aber vergleichsweise gering ausfällt.

Insgesamt ist zu berücksichtigen, dass PPK im Laufe der Jahre und in Abhängigkeit der Milieubedingungen Abbauprozessen unterlagen. Demnach ist zu vermuten, dass die eigentlichen jahresspezifischen Gehalte - vor allem in frühen Jahren der Ablagerung – deutlich höher einzustufen sind.

In abgeschwächter Form trifft dies auch auf die biologisch schwerer abbaubaren Stofffraktionen Holz und Textilien zu. Die graphische Darstellung dieser Zusammenhänge ist den Anhängen 69 bis 81 zu entnehmen.

Für die Darstellung der räumlichen Potenzialermittlung bedeuten die zuvor gewonnenen Erkenntnisse, dass die Ableitung des mittleren Stoffpotenzials pro Bohrloch eine geeignete Beurteilungsgrundlage darstellt. Die bei der räumlichen Interpolation gewonnenen Ergebnisse sind den Abbildungen 109 bis 111 zu entnehmen.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden an dieser Stelle ausschließlich die in Tabelle 30 zusammengefassten Stoffgruppen dargestellt. Die räumliche Darstellung der einzelnen Stofffraktionen erfolgt im Anhang 82 bis 95.

TABELLE 30: ZUSAMMENFASSUNG DER STOFFFRAKTIONEN ZU STOFFGRUPPEN

Stofffraktion	Stoffgruppe
Fe-Metalle NE-Metall	Metalle
PPK Kunststoffe Holz/ Organik Textilien Verpackungen Stoffe ang. Sortierreste	Heizwertreiche Fraktion
Glas Mineralstoffe	Inertes

Metalle, die Anteile zwischen 1,5 und 3 Gew.-% FM der Gesamtablagerungsmenge ausmachen, treten räumlich gesehen in höheren Konzentrationen im mittleren Deponiebereich sowie im Umkreis der Müllumladestation (MUST II) auf. Zum nordwestlichen und südöstlichen Deponiebereich nehmen die Anteile nach aktueller Datenlage eher ab.

Der Anteil der heizwertreichen Fraktion nimmt im Gegensatz vom nordwestlichen zum südöstlichen Deponiebereich ab. Die Reduktion nimmt dabei eine Größenordnung von ca. 40 Gew.-% FM an. Eine Erklärung hierfür könnte sein, dass der südöstliche Rand die Grenzfläche zur aktuellen Ablagerungsfläche darstellt und technisch bedingt überwiegend inerte Materialien deponiert wurden. Hierfür sprechen zudem die räumlichen Auswertungen der Korngrößenverteilung, die in diesem Bereich die höchsten Feinanteile aufweisen.

Mineralstoffe und Glas sind mit Ausnahme des Bohrlochs BII/2 (Monochargen Bauschutt) gleichmäßig über den gesamten Deponiekörper verteilt. Sie treten dabei in Anteilen von 1,0 bis 5,0 Gew.-% FM der Gesamtablagerung auf.

In Hinblick auf einen großtechnischen Rückbau weist unter derzeitigen Gesichtspunkten sowie aus rohstofflicher Sicht der nordwestliche und mittlere Deponiebereich die höchsten Potenziale auf. Für den südöstlichen Deponiebereich ist zudem zu berücksichtigen, dass dieser direkt an den neuen Ablagerungsabschnitt anschließt und hieraus mögliche Probleme resultieren können.

Aufgrund der vorgegebenen Lage der Untersuchungsstandorte sind nach aktuellem Erkenntnisstand keine Aussagen über das Rohstoffpotenzial des südwestlichen Bereichs möglich. Weitere Untersuchungen in Form von Probebohrungen oder Schürfen sollten hier aus wissenschaftlicher Sicht stattfinden. Es ist zu vermuten, dass aufgrund des Alters der dort lagernden Abfälle ein erhöhtes Rohstoffpotenzial vorherrscht.

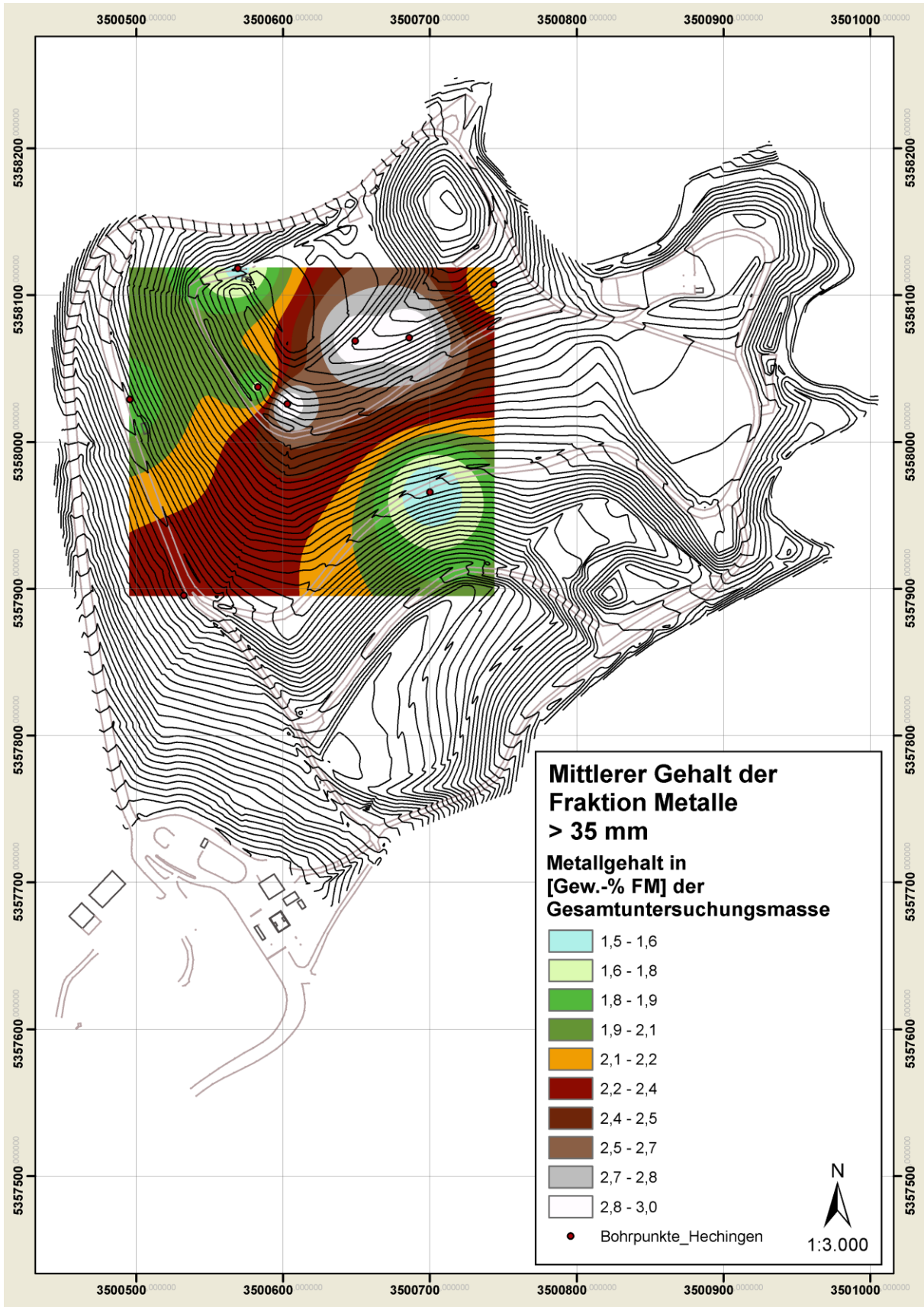


ABBILDUNG 109: RÄUMLICHE VERTEILUNG DES METALLGELIALTS DER FRAKTION > 35 MM ÜBER DEN DEPONIEKÖRPER DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

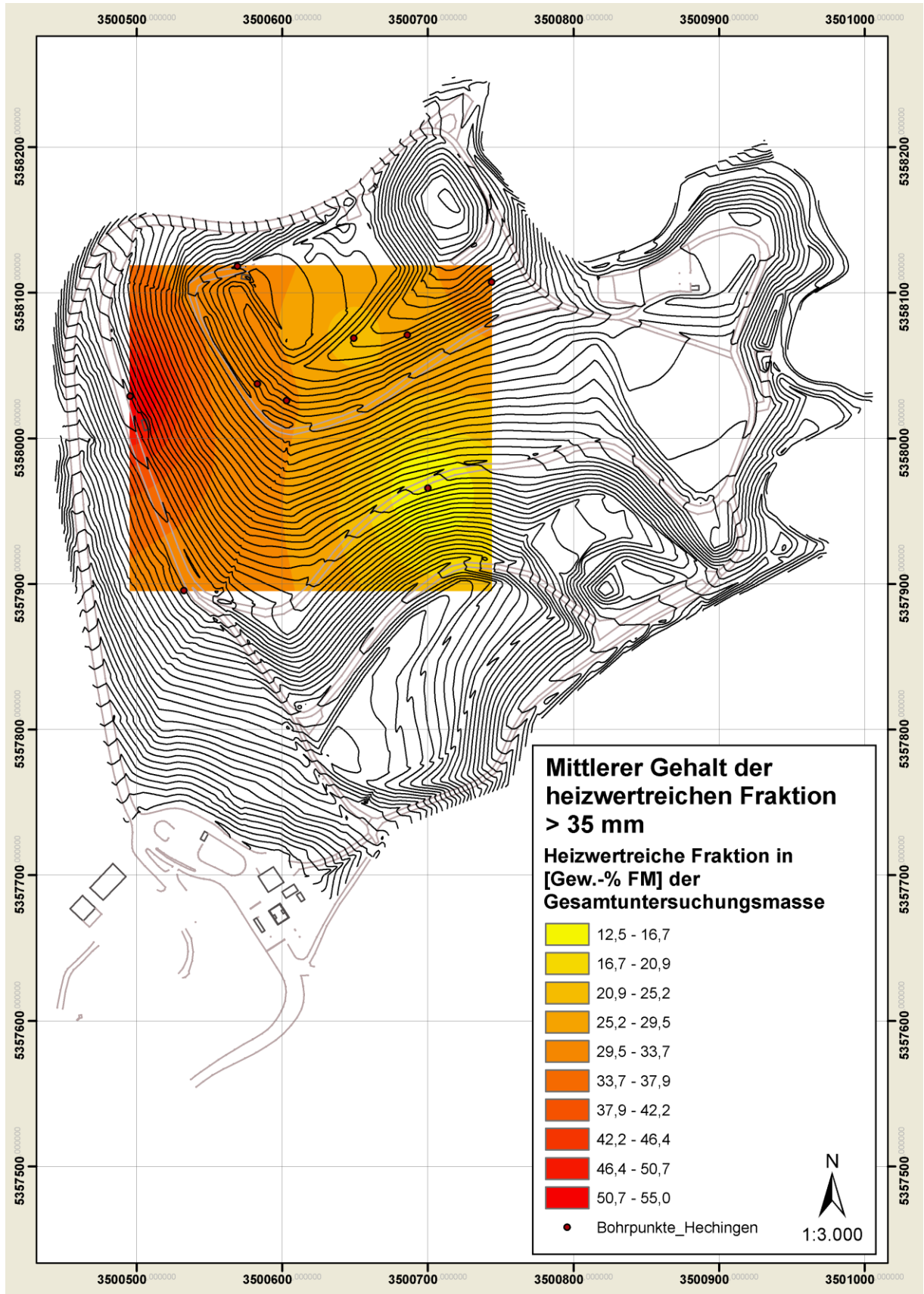


ABBILDUNG 110: RÄUMLICHE VERTEILUNG DES GEHALTS AN HEIZWERTREICHEN FRAKTIONEN IN BEZUG ZUR FRAKTION > 35 MM ÜBER DEN DEPONIEKÖRPER DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

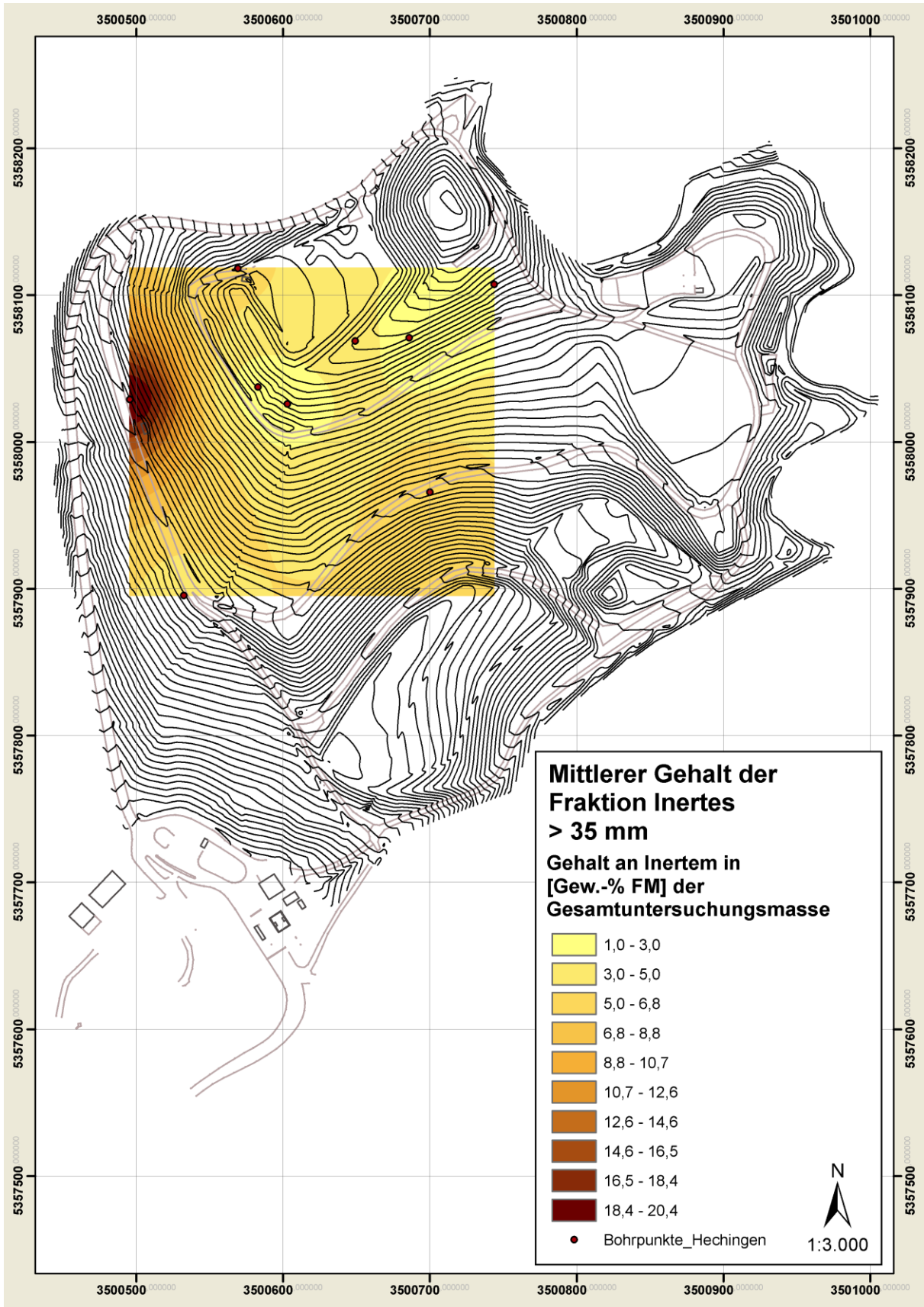


ABBILDUNG 111: RÄUMLICHE VERTEILUNG DES GEHALTS AN INERTEN MATERIALIEN IN BEZUG ZUR FRAKTION > 35 MM ÜBER DEN DEPONIEKÖRPER DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

5.2.4.2 NACHSORTIERUNG DER FRAKTION < 35 MM

Im Rahmen der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die gewonnene Fraktion < 35 mm ca. Zweidrittel des Deponiekörpers ausmacht. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob diese ein weiteres stoffliches oder energetisches Potenzial besitzt und eine tiefer greifende Aufbereitung des Deponieguts nutzeffizient sein könnte.

Die Abbildungen 112 und 113 verdeutlichen die dabei gewonnenen Erkenntnisse, wobei zu berücksichtigen ist, dass die hier angegebenen Frischmasseanteile aus methodischen Gründen rechnerisch bestimmt wurden⁵.

Wiederum zeigt sich, dass die Variationen zwischen den einzelnen Bohrstaffeln vergleichsweise gering ausfallen. Im Mittel konnten dabei etwa 1,3 Gew.-% FM Fe-Metalle und ca. 0,2 Gew.-% FM NE-Metalle separiert werden. Höhere Potenziale zeigen sich zudem im Bereich der Stofffraktionen Kunststoffe, Glas, Sortierreste und Mineralstoffe. Neben Holz und Textilien, die 1,9 und 2,7 Gew.-% FM der Fraktion < 35 mm ausmachen, treten die übrigen Stofffraktionen zu unter einem Gew.-% FM oder überhaupt nicht auf.

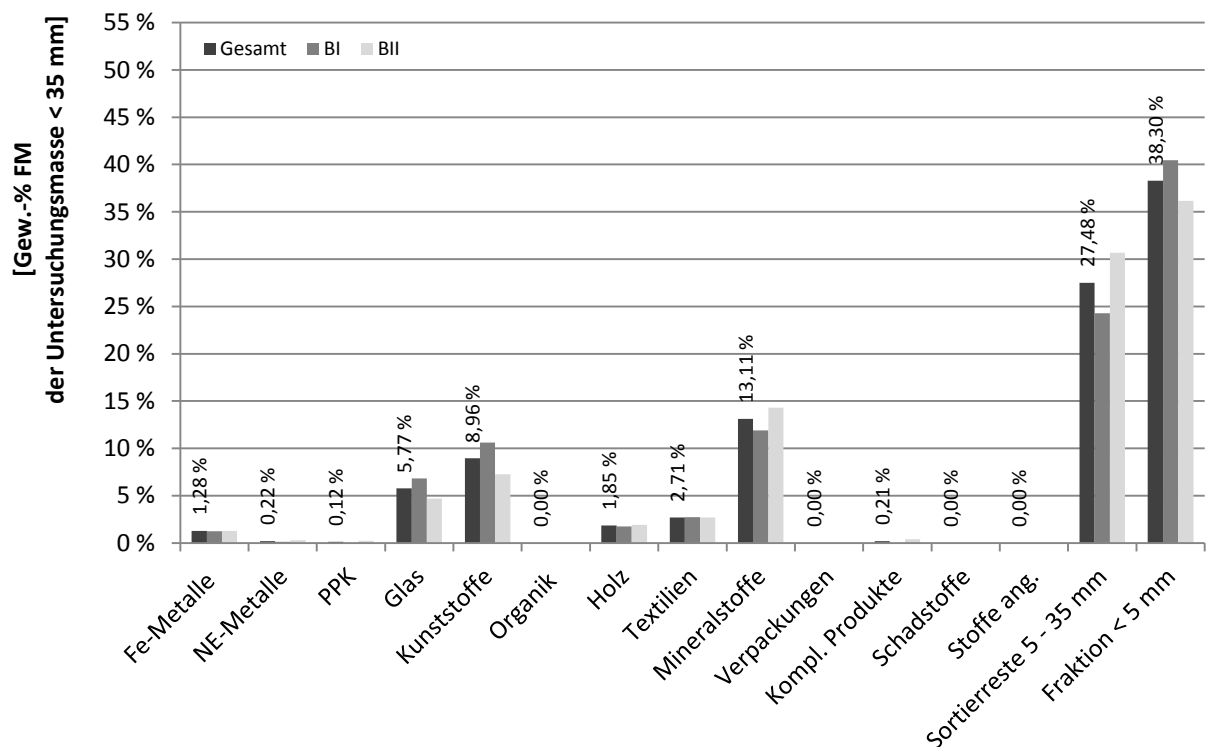


ABBILDUNG 112: DURCHSCHNITTliche ZUSAMMENSETZUNG DES UNTERSUCHTEN DEPONIEGUTS IN BEZUG ZUR GESAMTEN UNTERSUCHUNGSMASSE < 35 MM UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER BOHRSTAFFELN I UND II (BI UND BII) SOWIE DEREN MITTELWERT (GESAMT) – VERGL. ANHANG 97

Durch die erneute Klassierung dieser Fraktion auf < und > 5 mm würden sich im Siebüberlauf die in Abbildung 113 dargestellten Potenziale ergeben. Es wird deutlich, dass wie im Fall des ersten Klassierschritts durch einfache und kostengünstige Maßnahmen eine Aufkonzentration der Rohstoffpotenziale erzielt werden kann. Die dabei gewonnene Fraktion < 5 mm besteht in diesem

⁵ Im Rahmen der Nachsortierung war es notwendig, die einzelnen Deponiegutproben durch ein 5 mm Rundsieb zu waschen und anschließend zu sortieren. Die hier angenommenen Wassergehalte orientieren sich an den stoffspezifischen Wassergehaltswerten der Grobfraktion.

Kontext im Wesentlichen aus mineralischen Bestandteilen und könnte ggf. als Ersatzbaustoff verwertet werden. Eine detaillierte Auflistung der Ergebnisse der Nachsortierung findet sich im Anhang 96 bis 99.

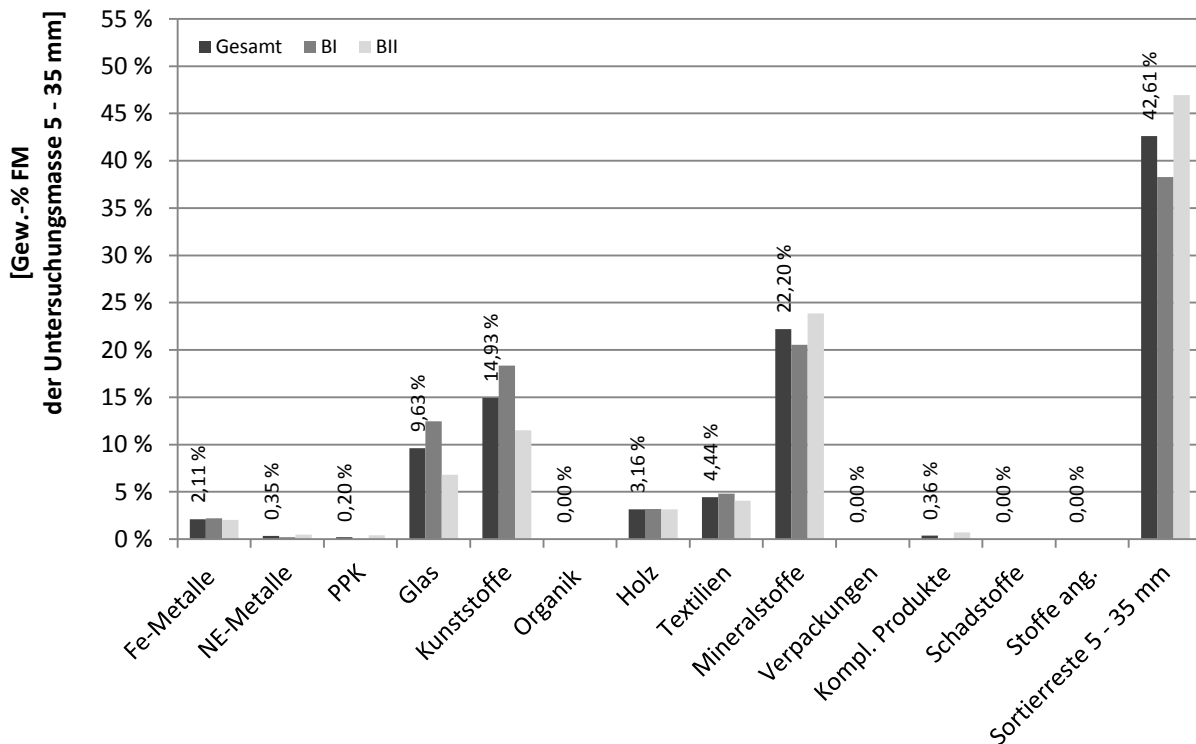


ABBILDUNG 113: DURCHSCHNITTLICHE ZUSAMMENSETZUNG DES UNTERSUCHTEN DEPONIEGUTS IN BEZUG ZUR GESAMTEN UNTERSUCHUNGSMASSE 5 - 35 MM UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER BOHRSTAFFELN I UND II (BI UND BII) SOWIE DEREN MITTELWERT (GESAMT) – VERGL. ANHANG 99

Die Variation der einzelnen Deponiegutchargen hinsichtlich der Zusammensetzung der Fraktion < 35 mm und 5 – 35 mm wird aus den Abbildungen 114 und 115 deutlich.

Auffällig sind in diesem Zusammenhang größere Abweichungen der Fraktionen Sortierreste, Mineralstoffe, Kunststoffe und Glas. Die übrigen Stofffraktionen zeigen hingegen nur geringfügige Abweichungen. Auf Basis der genannten Ergebnisse können die Rohstoffpotenziale der Fraktion < 35 mm wie folgt definiert werden:

- Mit im Mittel 39 Gew.-% der FM machen Materialien < 5 mm den Hauptanteil der Fraktion < 35 mm aus. Diese könnten nach aktueller Einschätzung ihren Einsatz als Deponieersatzbaustoff finden.
- Gleiches gilt für Mineralstoffe, die im Durchschnitt 13 Gew.-% der FM darstellen.
- Daneben treten Sortierreste und Kunststoffe als energetisch verwertbare Fraktionen auf. Gemeinsam liegt ihr Anteil in vergleichbaren Bereichen der Fraktion < 5 mm.
- Glas zeigt mit 6,0 Gew.-% der FM ein ebenfalls ausschöpfbares Wertstoffpotenzial auf.
- Der Anteil der Fe- und NE-Metalle besitzt geringe Variationen. Demnach kann ihr Potenzial in diesem Zusammenhang vergleichsweise genau abgeschätzt werden. Insgesamt besteht demnach die FM der Fraktion < 35 mm aus insgesamt 1,5 Gew.-% Metallen.

- Neben heizwertreichen Hölzern und Textilien beschreiben die übrigen Stofffraktionen Anteile von unter einem Gew.-% der FM. Ihr Beitrag zur Wertschöpfung ist entsprechend gering einzustufen.

Hieraus ergibt sich, dass diese Fraktion durchaus Rohstoffpotenziale im Bereich der heizwertreichen Fraktion und Metalle besitzt. Zudem könnte die abgetrennte Fraktion < 5 mm unter den vorgefundenen Bedingungen ohne weitere Behandlung (bspw. Reduktion der organischen Substanz) ihren Einsatz als Deponieersatzbaustoff finden.

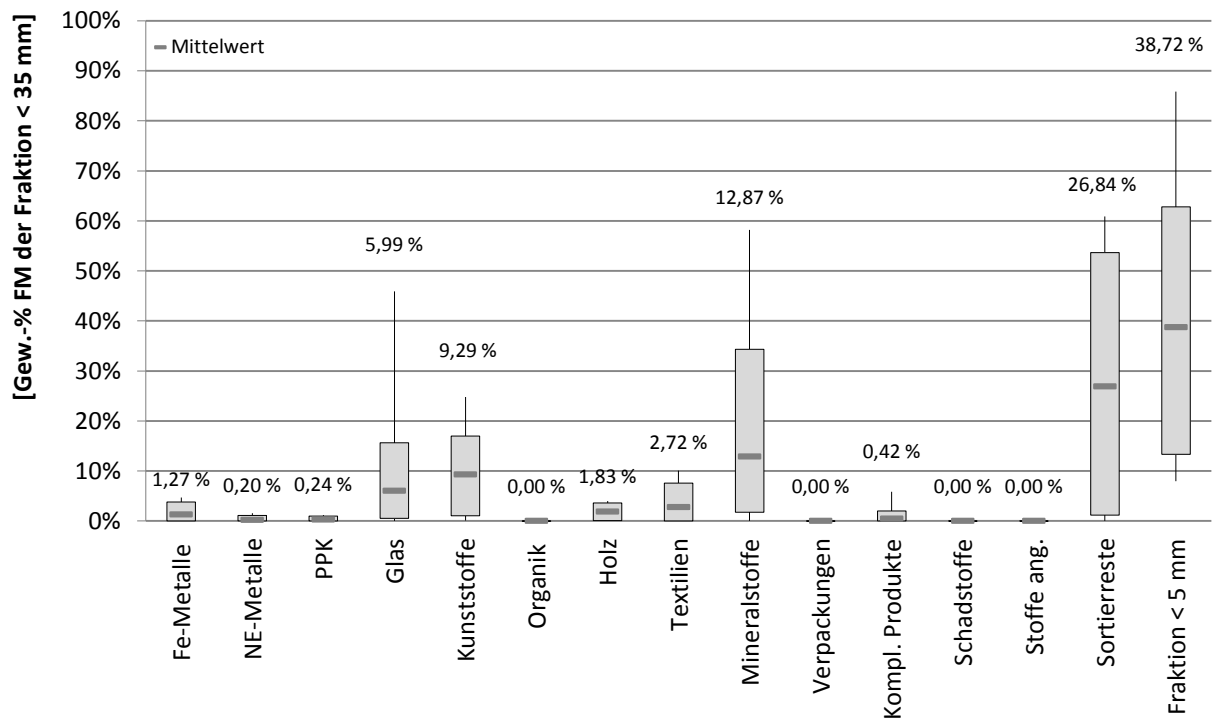


ABBILDUNG 114: VARIATIONSBREITE DER ZUSAMMENSETZUNG DER UNTERSUCHTEN DEPONIEGUTCHARGEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER FRAKTIONSMENGE < 35 MM (VERGL. ANHANG 97)

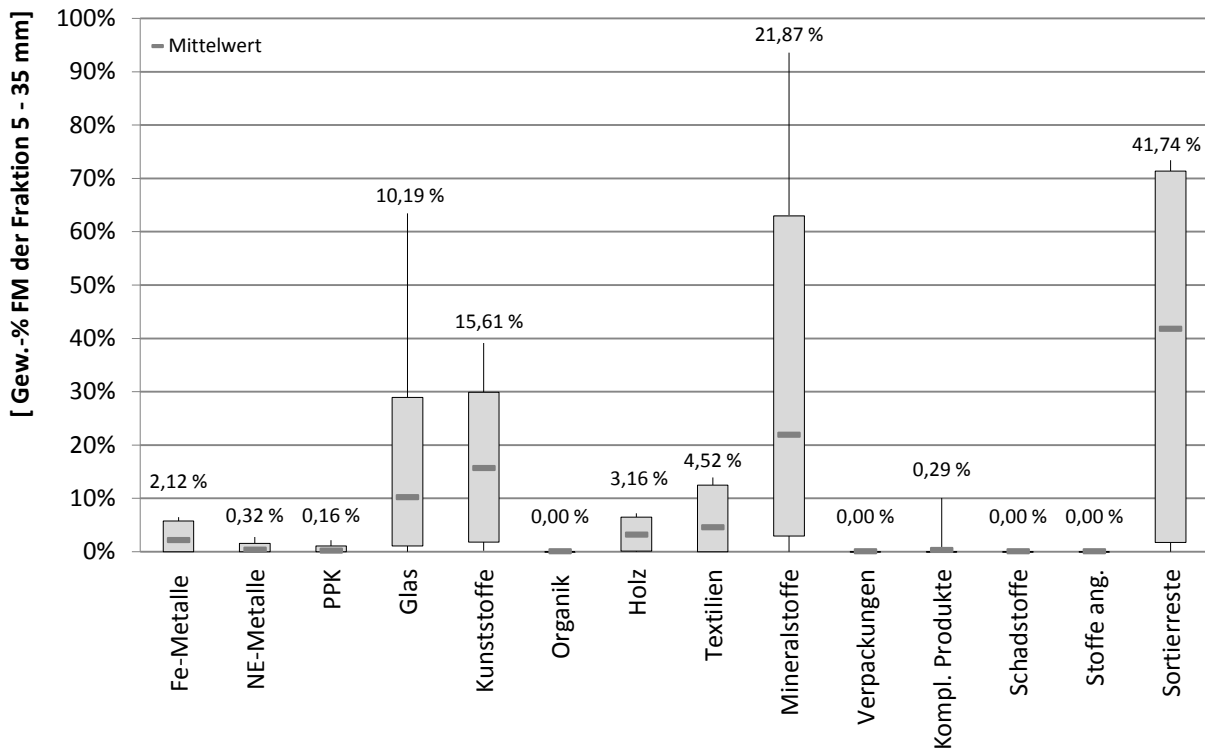


ABBILDUNG 115: VARIATIONSBREITE DER ZUSAMMENSETZUNG DER UNTERSUCHTEN DEPONIEGUTCHARGEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER FRAKTIONSMENGE 5 - 35 MM (VERGL. ANHANG 99)

5.2.4.3 DEPONIEGUTZUSAMMENSETZUNG

Die reale Zusammensetzung des Deponieguts ergibt sich aus der Verschneidung der Ergebnisse der in-situ Sortierung und der Nachsortierung. In einem weiteren Schritt werden zudem die stoffspezifischen Wassergehalte in der Berechnung betrachtet.

Auf Grundlage der beiden Bohrstaffeln ergibt sich das mittlere Rohstoffpotenzial der Kreismülldeponie aus Abbildung 116. Neben Sortierresten und der Fraktion < 5 mm, die gemeinsam etwa 50 Gew.-% FM ausmachen, treten Kunststoffe mit knapp 17 Gew.-% FM auf. Die nächst größeren Anteile weisen Mineralstoffe und Textilien auf. Sie machen ca. 13 und 8 Gew.-% der FM aus. Metalle, Glas und Holz sind in Größenordnungen von 3 bis 4 Gew.-% FM zu vermuten. Die übrigen Stofffraktionen konnten hingegen zu unter einem Gew.-% FM vorgefunden werden.

Neben den einzelnen Fraktionsanteilen an der Gesamtuntersuchungsmasse verdeutlicht Abbildung 117 das Rohstoffpotenzial der Fraktion > 5 mm. Hierbei bleiben die Verhältnisse der betrachteten Stofffraktionen zwar gleich, dennoch wird erneut deutlich, dass aus der Abtrennung einer Klassierfraktion starke Rohstoffanreicherungen resultieren.

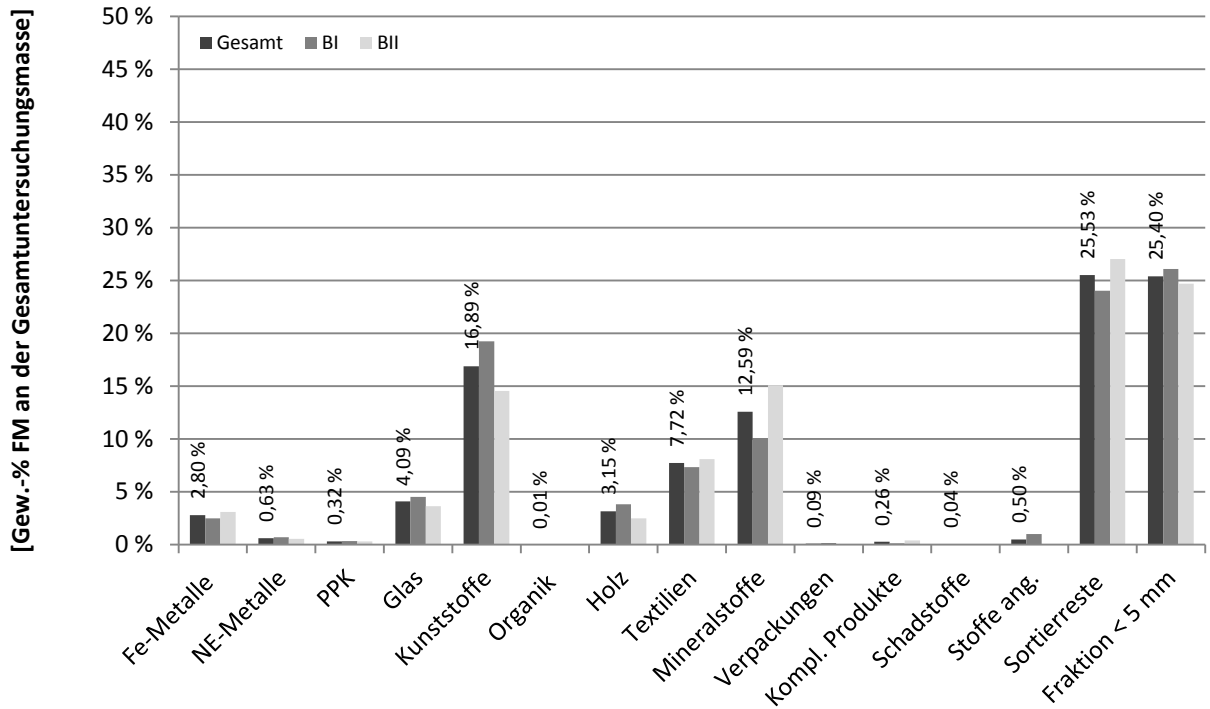


ABBILDUNG 116: MITTLERE DEPONIEGUTZUSAMMENSETZUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER GESAMTUNTERSUCHUNGSMASSE UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER BOHRSTAFFELN I UND II (BI UND BII) SOWIE DEREN MITTELWERT (GESAMT)

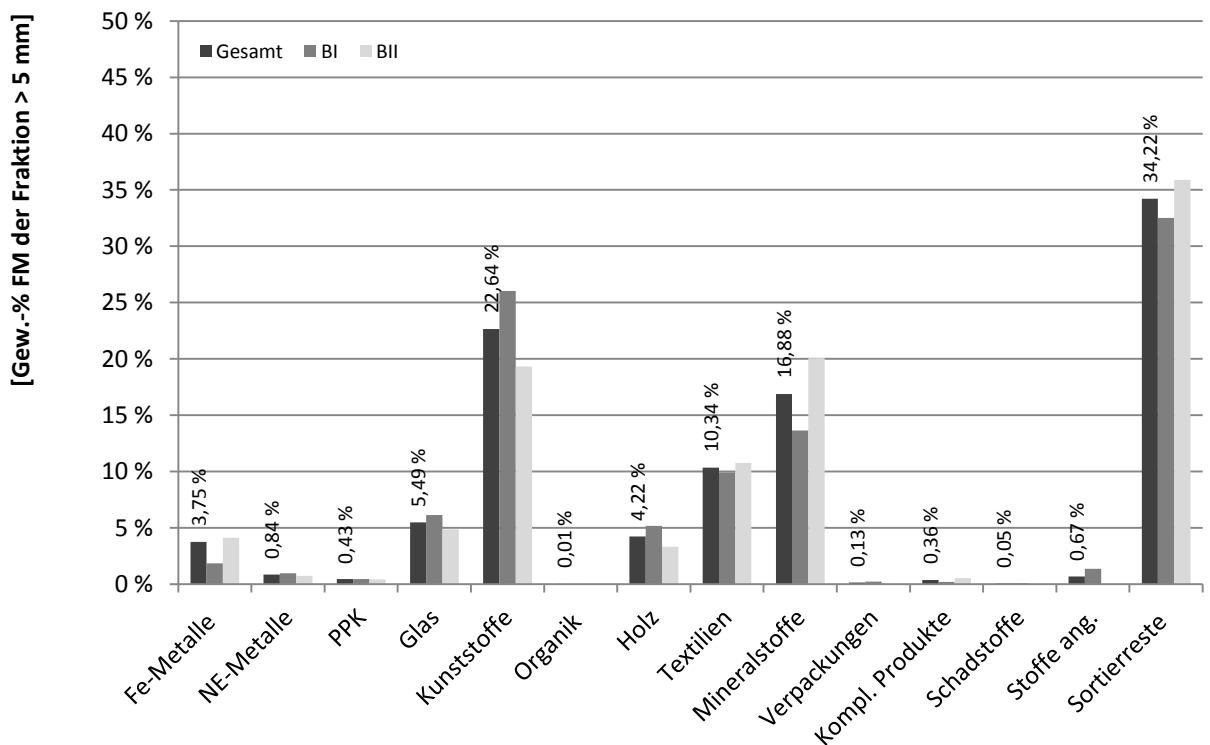


ABBILDUNG 117: MITTLERE DEPONIEGUTZUSAMMENSETZUNG IN BEZUG AUF DIE UNTERSUCHUNGSMASSE > 5 mm UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER BOHRSTAFFELN I UND II (BI UND BII) SOWIE DEREN MITTELWERT (GESAMT)

Die vorgefundene Variation der einzelnen Fraktionsanteile an der Gesamtuntersuchungsmasse und der analysierten Fraktion > 5 mm ist in Abbildung 118 und 119 dargestellt. Wie bereits zuvor zeigen sich für Kunststoffe, Mineralstoffe, Sortierreste sowie die Fraktion < 5 mm die größten Unsicherheiten.

In Bezug auf die Gesamtmasse können Metalle mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % in einer Größenordnung von 1 bis 7 Gew.-% FM im Deponiekörper auftreten. Die heizwertreiche Fraktion macht bei dieser Betrachtung einen mittleren Anteil von bis zu 55 Gew.-% der FM aus. Schadstoffe, die im Rahmen der Sortieranalysen ausschließlich aus haushaltsüblichen und heute verwertbaren Altbatterien bestanden, liegen selbst im Extremfall zu unter einem Gew.-% FM vor. Komplexe Produkte, die ein hohes Maß an NE-Metallen und Seltenen Erden vermuten lassen, liegen zu maximal 4 Gew.-% FM vor.

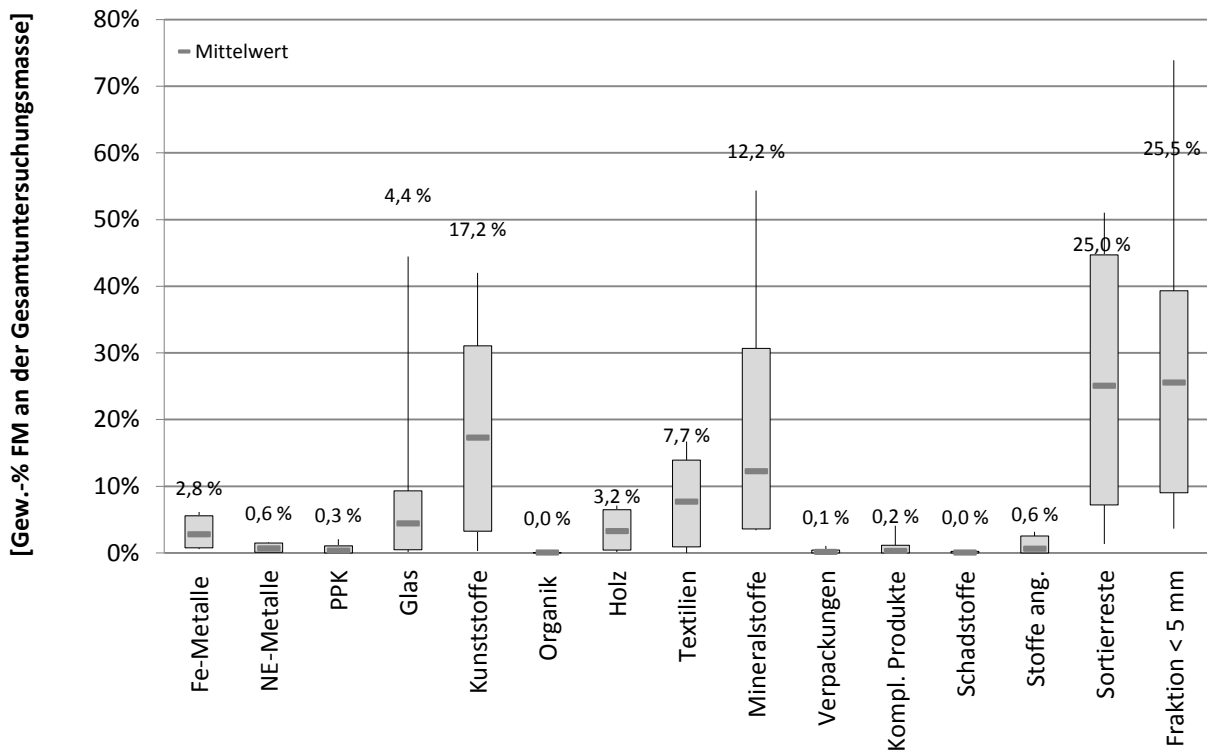


ABBILDUNG 118: VARIATIONSBREITE DER DEPONIEGUTZUSAMMENSETZUNG > 5 MM UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER GESAMTUNTERSUCHUNGSMASSE

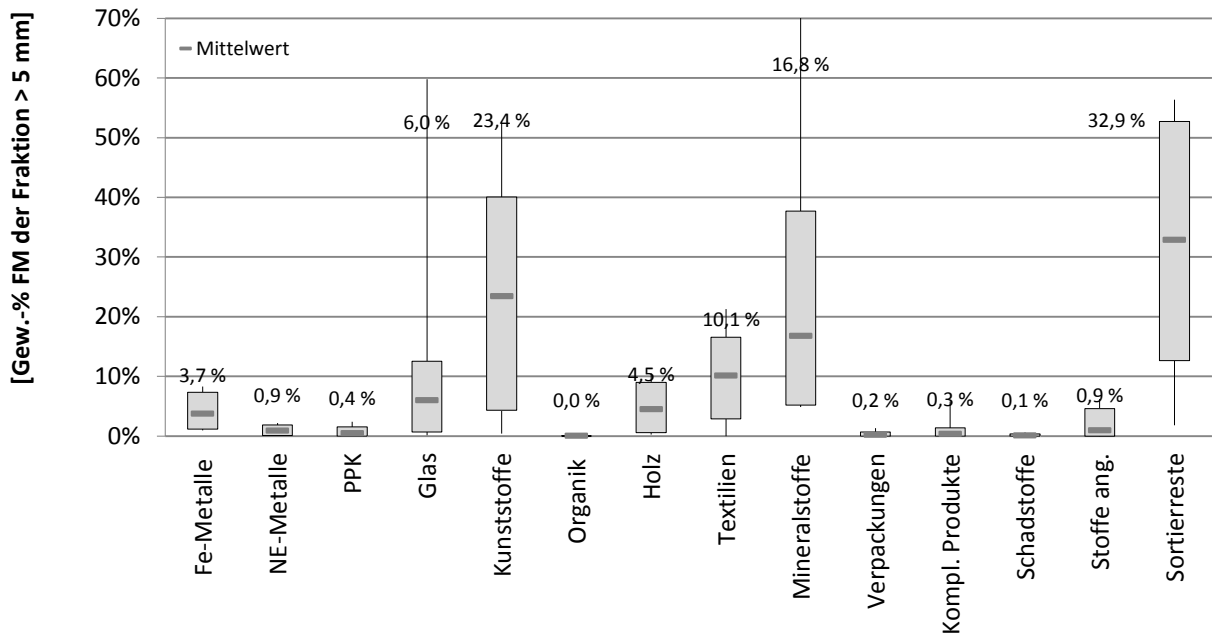


ABBILDUNG 119: VARIATIONSBREITE DER DEPONIEGUTZUSAMMENSETZUNG > 5 MM UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER UNTERSUCHUNGSMASSE > 5 MM

Unter Berücksichtigung der spezifischen Wassergehalte verschieben sich die Anteile der Stofffraktionen wie in Abbildung 120 aufgezeigt. Es zeigt sich, dass durch Trocknung des Deponieguts eine Aufkonzentration von Fe- und NE-Metallen, Glas, Kunststoffen sowie Mineralien erreicht werden kann. Der Anteil der Fe- und NE-Metalle sowie der von Glas wächst dabei um ca. Faktor 1,5. Kunststoffe und Mineralstoffe folgen mit Anteilszunahmen von etwa 30 bis 40 Gew.-%. Im Gegenzug mindern sich die Gehalte der Fraktionen < 5 mm, der Sortierreste, der Textilien, des Holzes und der PPK-Fraktion.

Die dabei aufgetretenen chargenspezifischen Abweichungen der Zusammensetzung werden aus Abbildung 121 und Abbildung 122 ersichtlich.

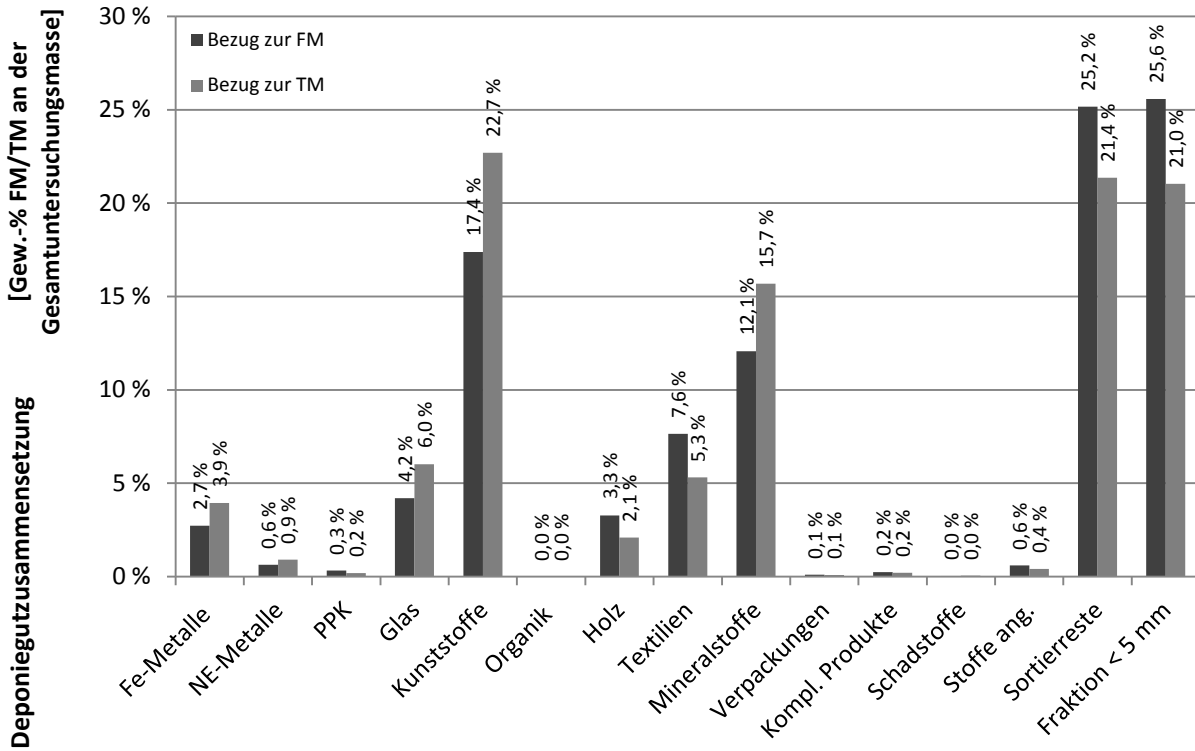


ABBILDUNG 120: MITTLERE STOFFGEHALTE UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DES SPEZIFISCHEN WASSERGEHALTS DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

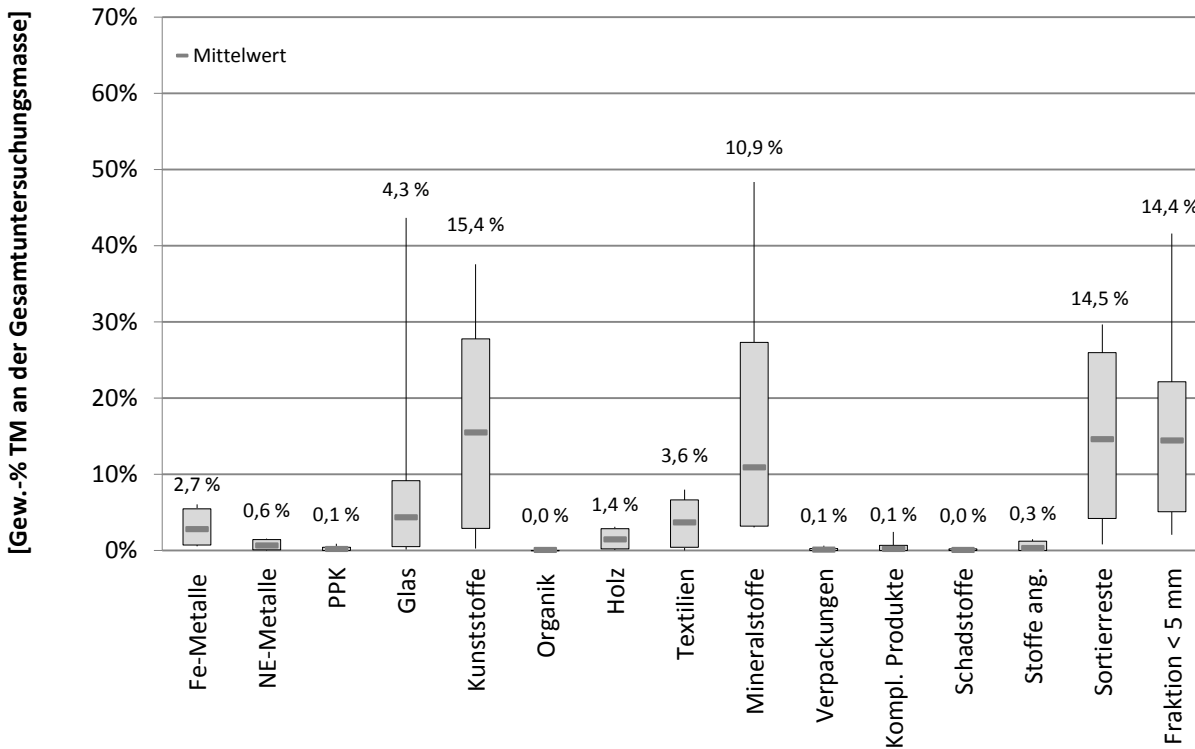


ABBILDUNG 121: VARIATIONSBREITE DER ANTEILE DER STOFFFRAKTIONEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER GESAMTUNTERSUCHUNGSMASSE

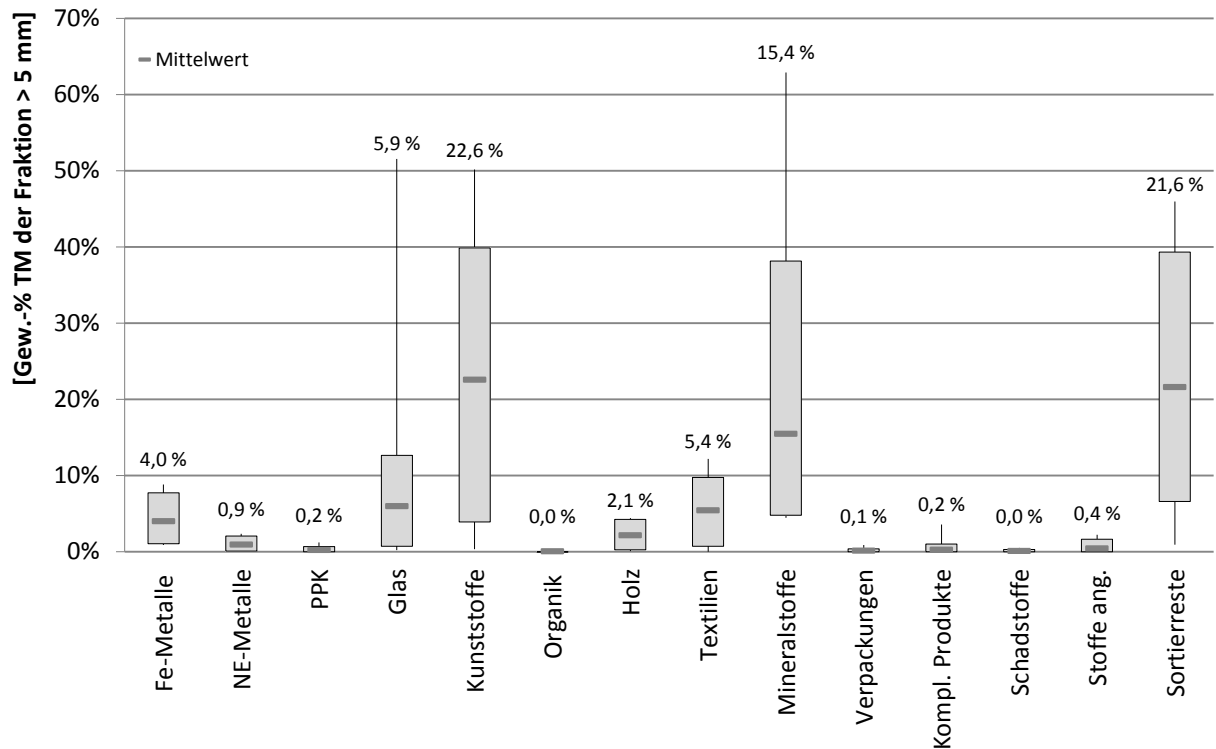


ABBILDUNG 122: VARIATIONSBREITE DER ANTEILE DER STOFFFRAKTIONEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER MASSE DER FRAKTION > 5 MM

5.2.4.4 REALE POTENZIALANALYSE

Die Kombination der spezifischen Deponiegutzusammensetzung mit den modellierten Ablagerungsmengen führt zur Ableitung des realen Ressourcenpotenzials der Kreismülldeponie Hechingen. Hierbei muss wie bereits zuvor die Variation der Ablagerungsmenge und der Deponiegutzusammensetzung berücksichtigt werden. Prozesse des biologischen Abbaus sowie die spezifischen Wassergehalte sind ebenfalls in den Analysen der realen Potenzialanalyse zu berücksichtigen.

VARIATION DER ABLAGERUNGSMENGE

Die Auswirkungen der Variation der Ablagerungsmenge auf das reale Rohstoffpotenzial der Kreismülldeponie Hechingen werden aus Abbildung 123 und Anhang 100 deutlich.

Sortierreste und die Fraktion < 5 mm liegen demnach in Größenordnungen von jeweils ca. 470.000 Mg FM im Deponiekörper vor. Die Fraktion der Kunststoffe mit rund 320.000 Mg FM und Mineralstoffe mit 227.000 Mg FM bilden die nächst größeren Anteile der untersuchten Stofffraktionen aus. Mit 113.000 bis 164.000 Mg FM bilden Materialien zur Rekultivierung, Textilien und Schlämme weitere Fraktionen, die gewichtsbezogen zu über 5 % vorliegen. Metalle machen im Rahmen dieser Betrachtung Anteile von 63.000 Mg FM aus.

Aufgrund der Tatsache, dass einheitliche Deponiegutzusammensetzungen angenommen werden, zeigt sich ausschließlich im Bereich der Rekultivierungsmaterialien ein vergleichsweise großer Koeffizient der Variation. Dieser liegt mit 27 % etwa dreimal so hoch wie der der übrigen Stofffraktionen.

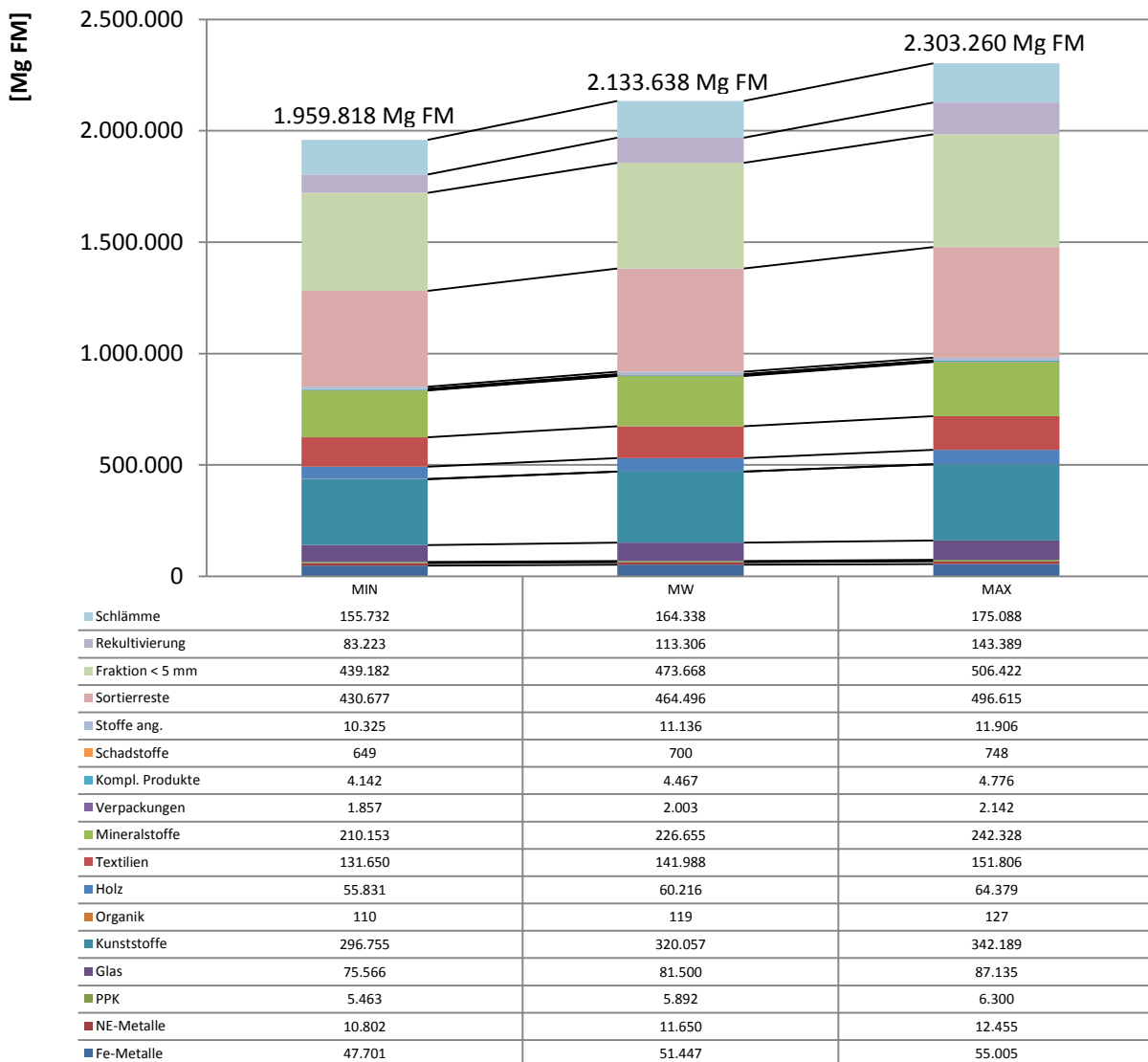


ABBILDUNG 123: AUSWIRKUNG DER VARIATION DER ABLAGERUNGSMENGE AUF DAS STOFFPOTENZIAL DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN BEI GLEICHBLEIBENDER DEPONIEGUTZUSAMMENSETZUNG | GESAMTBETRACHTUNG REAL (VERGL. ANHANG 100 – 102)

VARIATION DER DEPONIEGUTZUSAMMENSETZUNG

Die Abbildungen 124 und 125 machen deutlich, dass bei Berücksichtigung des $KI_{95\%}$ der Deponiegutsortieranaysen deutliche Mengenunterschiede der Gesamtablagerungs- und Stofffraktionsmenge auftreten. Diese spiegeln somit das Bild der theoretischen Potenzialabschätzung wider. Die Interpretation der Ergebnisse muss in diesem Fall also erneut in Abhängigkeit der Stofffraktionen erfolgen.

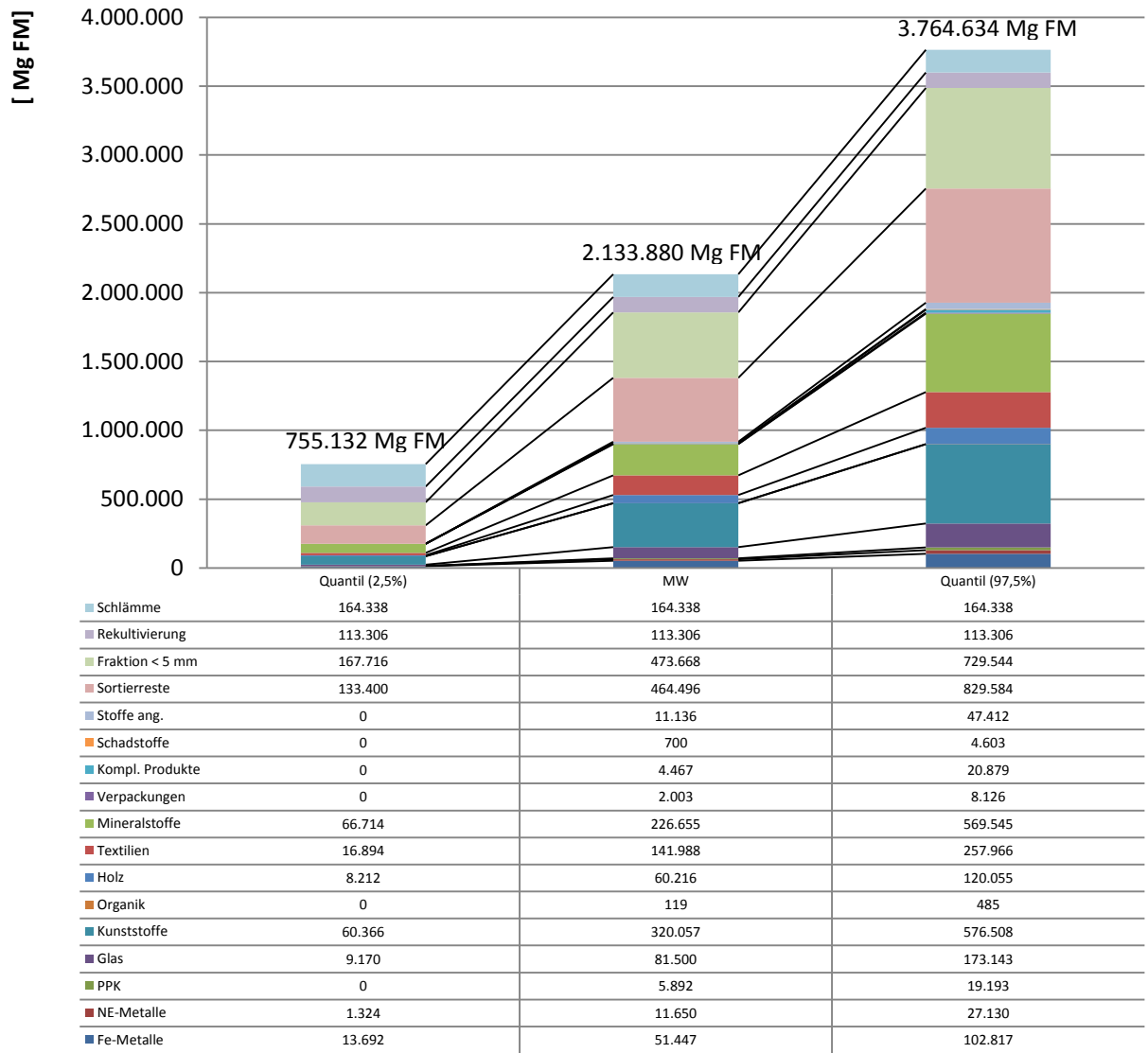


ABBILDUNG 124: AUSWIRKUNG DER VARIATION DER DEPONIEGUTZUSAMMENSETZUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER MITTLEREN GESAMTABLAGERUNGSMENGE | GESAMTBETRACHTUNG REAL (VERGL. ANHANG 103 UND 104)

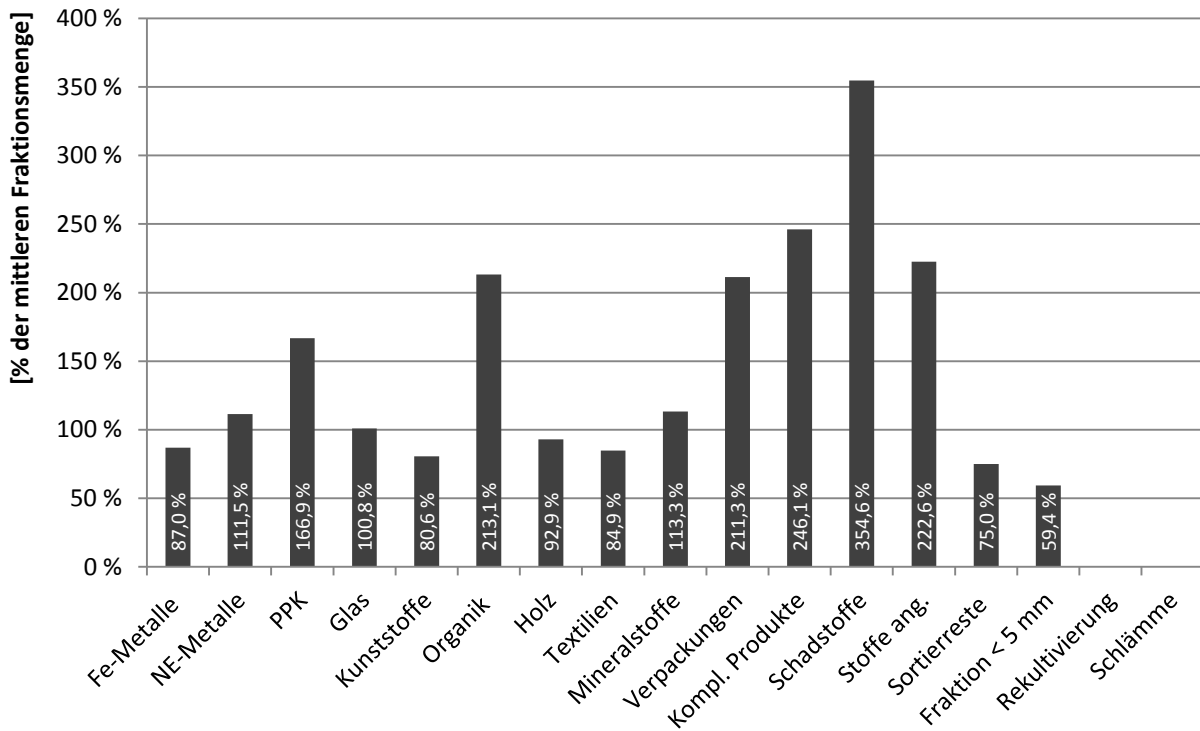


ABBILDUNG 125: VARIATIONSKOEFFIZIENT DER ABGELAGERTEN STOFFFRAKTIONEN UNTER BETRACHTUNG DER MITTLEREN STOFFSPEZIFISCHEN GESAMTABLAGERUNGSMENGE | VARIATION DEPONIEGUTZUSAMMENSETZUNG REAL

Wie aus den Abbildungen erkenntlich wird, bewirkt die Variation der Deponiegutzusammensetzung deutlich stärkere Unterschiede der modellierten, fraktionsspezifischen Ablagerungsmengen. Diese können mit Werten von über 200 % bei den Fraktionen Organik, Verpackungen, kompl. Produkte, Schadstoffe und Stoffe ang. als besonders hoch eingestuft werden. Diese Tatsache ist darauf zurückzuführen, dass diese Stoffe einen vergleichsweise geringen Mengenanteil an der Gesamtzusammensetzung darstellen und bereits kleinere, lokalspezifische Abweichungen zu großen Differenzen führen.

Die übrigen Variationen zeigen Abweichungen von 60 bis 100 % des Mittelwertes, die sich mit anderen Untersuchungen decken und auf die große Heterogenität des Deponiekörpers hinweisen bzw. daraus resultieren.

Insgesamt ist festzuhalten, dass sich - wie bereits im Fall des theoretischen Ressourcenpotenzials - Variationen der Deponiegutzusammensetzung deutlich stärker auf die reale Potenzialanalyse auswirken als Abweichungen der Ablagerungsmengen.

Ein direkter Zusammenhang der Variabilität ist daher zu vermuten. Hieraus ergibt sich entsprechend die Vermutung eines funktionalen Zusammenhangs des theoretischen und realen Ressourcenpotenzials.

Unter Berücksichtigung des beschriebenen Abbaus der organischen Substanz (Abbildung 65) ergibt sich das in Abbildung 126 aufgeführte Rohstoffpotenzial der Kreismülldeponie Hechingen. Hierbei werden die ermittelten Reduktionen der organischen Substanz den definierten Ablagerungsfraktionen - mit Ausnahme der Rekultivierungsmaterialien - angerechnet, woraus ebenfalls Reduktionen nicht abbaubarer Fraktionen resultieren.

Die abgelagerte Menge an Rekultivierungsmaterialien wird bei dieser Betrachtung nicht

berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass diese ausschließlich zur Abdeckung und Profilierung des Deponiekörpers der Kreismülldeponie Hechingen zum Einsatz gekommen sind. Eine entsprechende Untersuchung zur Zusammensetzung fand nicht statt, da es sich hierbei ausschließlich um Bodenmaterial handelte⁶.

Insgesamt verfolgt der Ansatz somit unabhängig von stoffspezifischen Eigenschaften der übrigen Abfallarten die Reduktion der Gesamtablagerungsmenge um den im Laufe der Jahre abgebauten organischen Anteil. Dies ermöglicht es, die ermittelte bzw. aktuelle Deponiegutzusammensetzung des Deponiekörpers der Kreismülldeponie Hechingen ins Verhältnis zur aktuellen Ablagerungsmasse zu setzen und somit das reale Rohstoffpotenzial abzuleiten.

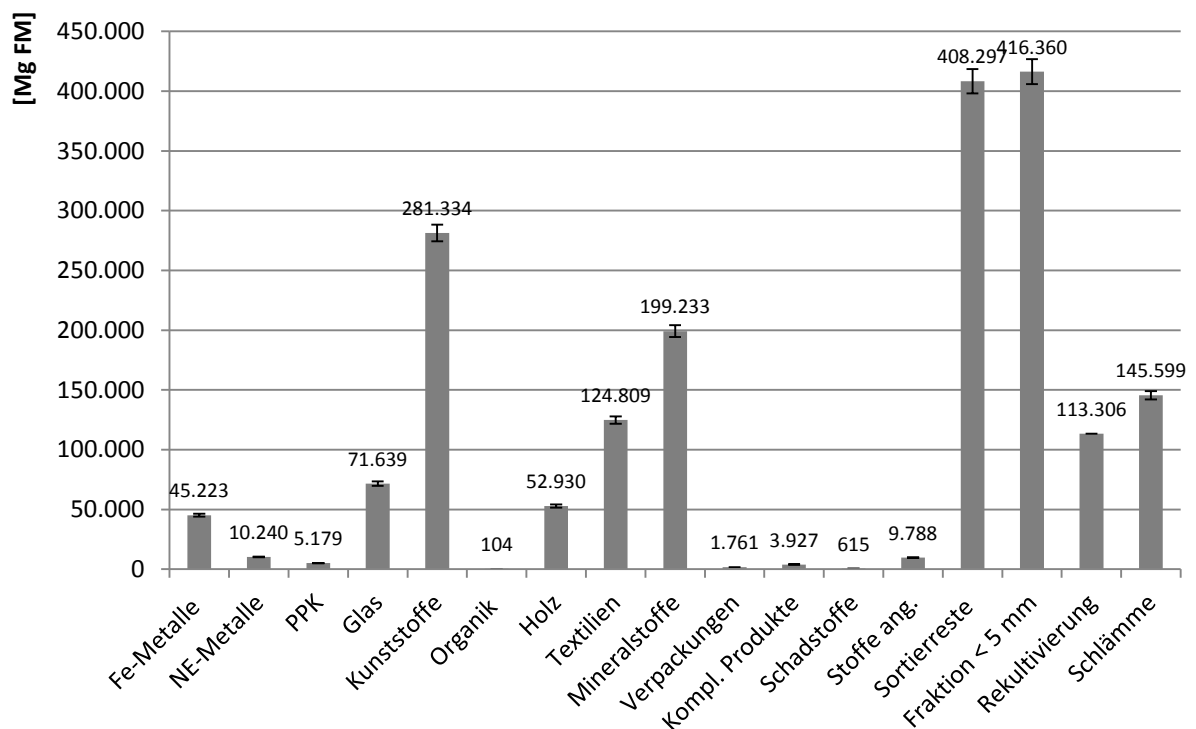


ABBILDUNG 126: REALES ROHSTOFFPOTENZIAL UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DES ABBAUS DER ORGANISCHEN SUBSTANZ (AUSGANGSMASSE: 2.133.638 MG WOVON 243.293 MG ORGANISCHE SUBSTANZ ABGEBAUT WURDEN)

Die Verschiebungen der Stoffanteile unter Berücksichtigung spezifischer Wassergehalte werden aus Abbildung 127 deutlich. Aufgrund identischer Annahmen zur theoretischen Potenzialermittlung reduzieren sich vor allem die Mengen an Sortierresten, PPK, Organik, Holz, Textilien, Materialien < 5mm sowie zur Rekultivierung und Schlämmen.

⁶ Oberen 2 bis 7 m des jeweiligen Bohrlochs bzw. die Deponiegutchargen BI/1/0, BI/2/0, BI/3/0, BI/4/0, BI/5/0, BI/6/0, BII/1/0, BII/2/0 und BII/3/0 vgl. Abbildung 28

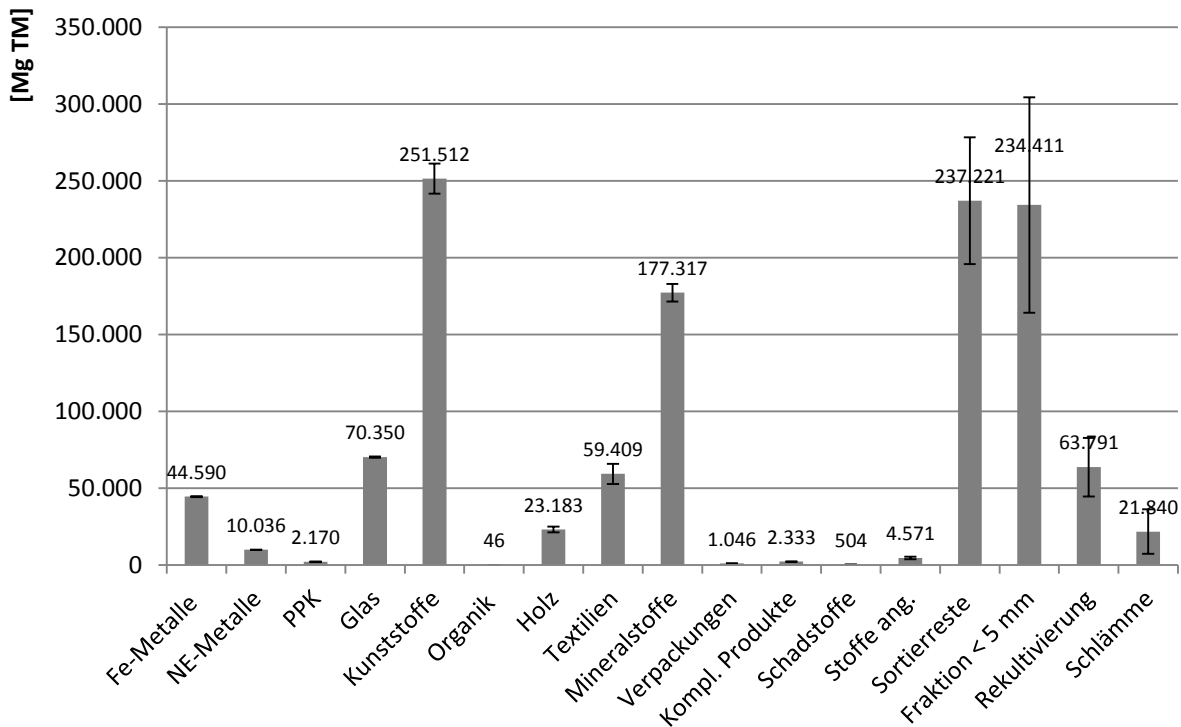


ABBILDUNG 127: REALE ZUSAMMENSETZUNG DES DEPONIEGUTS UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DES ABBAUS DER ORGANISCHEN SUBSTANZ UND STOFFSPEZIFISCHER WASSERGEHALTE (AUSGANGSMASSE: 2.133.638 MG WOVON 243.293 MG ORGANISCHE SUBSTANZ ABGEBAUT WURDEN UND 686.015 MG WASSER ABZUZIEHEN SIND)

5.2.5 THEORIE UND REALITÄT

Eine Validierung des theoretischen und realen Ressourcenpotenzials ergibt sich aus der Gegenüberstellung dieser beiden Kalkulationsgrößen. Hierbei wird aufgrund einheitlicher Annahmen im Bereich des Abbaus der organischen Substanz sowie des Wassergehalts, die Darstellung des Rohstoffpotenzials ausgehend von der TM gewählt.

Die in Abbildung 128 gezeigten Ergebnisse beschreiben sehr gute Übereinstimmungen beider Potenzialanalysen für die Stofffraktionen Fe-Metalle, NE-Metalle, Glas und Schlämme. In diesem Zusammenhang können prozentuale Abweichungen der Fe-Metallfraktion kleiner einem Prozent realisiert werden. Die prozentuale Abweichung von NE-Metallen, Glas und Schlämmen ist mit 15 bis 17 % zu beziffern.

Gute bis zufriedenstellende Ergebnisse sind auch für die Kunststofffraktion zu verzeichnen. Hierbei unterschätzt das theoretische Ressourcenpotenzial die reale Menge um ca. 45 %.

In Bereichen von Unter- und Überschätzungen in Höhe von 60 – 65 % sind die Stofffraktionen Textilien, Mineralstoffe und Reste sowie die Feinfraktion angesiedelt.

Für die übrigen Fraktionen scheinen keine direkten Übereinstimmungen vorhanden zu sein. So übersteigt bspw. das theoretische Potenzial an Organik die Realität um mehr als das 1.900-fache. Es ist zu vermuten, dass fehlende organische Bestandteile im Rahmen der realen Potenzialermittlung in Form von Anhaftungen an anderen Stofffraktionen wie bspw. der Rest- und Feinfraktion miterfasst wurden.

Die vorliegenden starken Überschätzungen der Fraktionen komplexe Produkte, Verbundverpackungen und Problemabfälle gilt es durch fachliche Anpassung beider Modelle zu minimieren. Dabei ist zu bedenken, dass aufgrund der Methodik der Deponiegutuntersuchungen ebenfalls Fehleinschätzungen des Stoffpotenzials zu vermuten sind. So kann bspw. das vergleichsweise geringe Auftreten der Stofffraktion „Komplexe Produkte“ aus der Beprobung des Deponiekörpers mittels Schneckenbohrer resultieren. Dieser kann voraussichtlich aufgrund seiner technischen Ausführung keine größeren Abfallkomponenten, also die hier ausgewiesenen „Komplexen Produkte“ erfassen. Es ist daher anzunehmen, dass in diesem Fall eine Unterschätzung stattfindet.

Im Bereich der Verpackungsabfälle ist zudem denkbar, dass diese aufgrund ihrer stofflichen Ähnlichkeit der Kunststofffraktion zugeordnet wurden.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass sich im Bereich der Metallfraktion deutliche Übereinstimmungen der Theorie und Realität zeigen. Hieraus kann abgeleitet werden, dass potenzielle Über- oder Unterschätzungen des Anteils dieser Fraktion äußerst gering ausfallen.

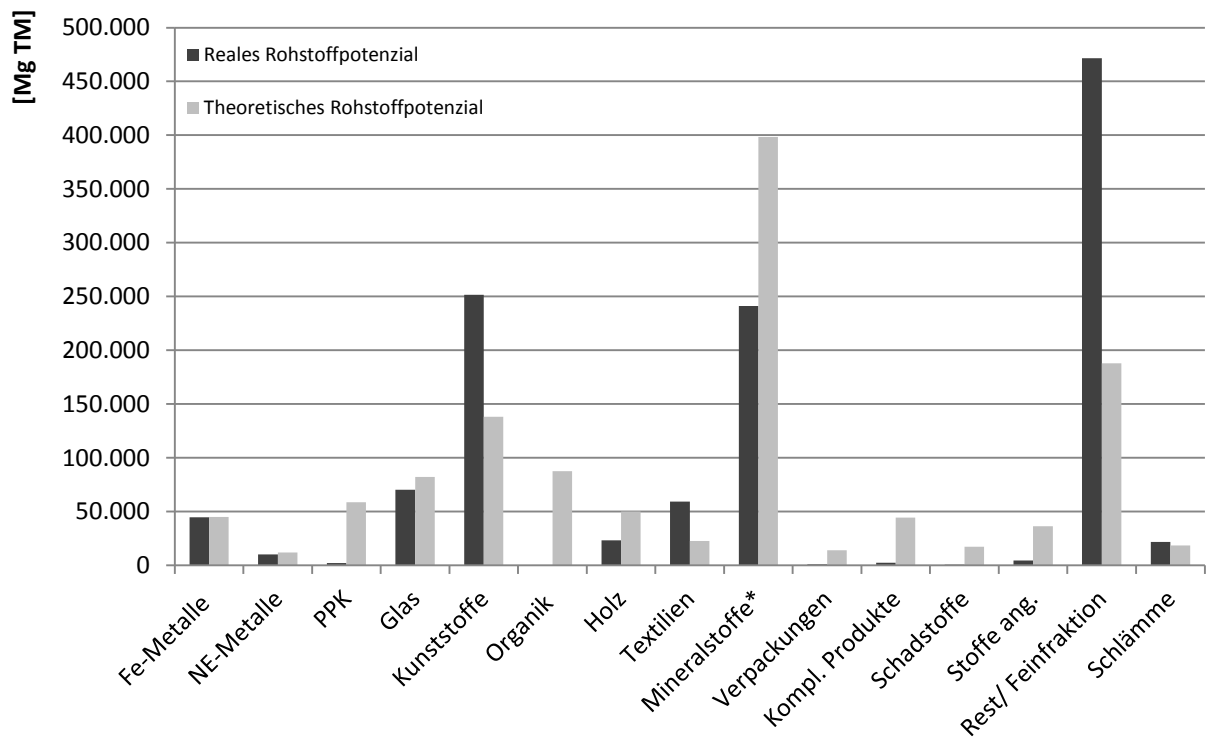


ABBILDUNG 128: GEGENÜBERSTELLUNG DES MITTLEREN REALEN UND THEORETISCHEN RESSOURCENPOTENZIALS DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN
 * INCL. REKULTIVIERUNG/ ERDAUSHUB

5.3 VERWERTUNGSOPTIONEN EINZELNER STOFFFRAKTIONEN

5.3.1 STOFFLICHE VERWERTUNG

FRAKTION < 35 MM

Die Möglichkeit, die Fraktion < 35 mm erneut abzulagern oder als Deponieersatzbaustoff einzusetzen, hängt im Wesentlichen von den in Tabelle 2, Anhang 3 der Deponieverordnung [DEPV, 2009] definierten Zuordnungswerten ab. Tabelle 31 zeigt die dabei gewonnenen Erkenntnisse und rückt sie unter Berücksichtigung unterschiedlicher Deponieklassen in den Kontext der Verordnung.

TABELLE 31: ERGEBNISSE DER ELUATUNTERSUCHUNGEN DER FEINFRAKTION DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

Parameter	Einheit	Kreismülldeponie Hechingen		Zuordnungswerte DEPv [2009]			
		Median	MAX	DK 0	DK I	DK II	DK III
Glühverlust	Gew.-%	32,1	47,7	3,0	3,0	5,0	10,0
pH-Wert	-	7,5	8,80	5,5 - 13,0	5,5 - 13,1	5,5 - 13,2	4,0 - 13,3
Leitfähigkeit	µS*cm ⁻¹	3.160,0	5090,0	-	-	-	-
DOC	mg*l ⁻¹	117,1	780,9	50,0	50,0	80,0	100,0
Phenole*	mg*l ⁻¹	3,0	25,3	0,1	0,2	50,0	100,0
Antimon	µg*l ⁻¹	6,9	26,3	6,0	30,0	70,0	500,0
Arsen	µg*l ⁻¹	9,3	24,2	50,0	200,0	200,0	2.500,0
Barium	µg*l ⁻¹	30,6	359,8	2.000,0	5.000,0	10.000,0	30.000,0
Blei	µg*l ⁻¹	29,5	237,0	50,0	200,0	1000,0	5.000,0
Cadmium	µg*l ⁻¹	0,9	8,0	4,0	50,0	100,0	500,0
Chrom	µg*l ⁻¹	19,3	290,1	50,0	300,0	1.000,0	7.000,0
Kupfer	µg*l ⁻¹	288,1	5.329,2	200,0	1.000,0	5.000,0	10.000,0
Molybdän	µg*l ⁻¹	19,5	66,2	50,0	300,0	1.000,0	3.000,0
Nickel	µg*l ⁻¹	83,8	303,6	40,0	200,0	1.000,0	4.000,0
Quecksilber	µg*l ⁻¹	< 5,0	< 5,0	1,0	5,0	20,0	200,0
Selen	µg*l ⁻¹	< 5,00	< 5,00	10,0	30,0	50,0	700,0
Zink	µg*l ⁻¹	580,8	3132,2	400,0	2.000,0	5.000,0	20.000,0
Fluorid	µg*l ⁻¹	185,6	1160,6	1.000,0	5.000,0	15.000,0	50.000,0
Chlorid	mg*l ⁻¹	225,2	570,3	80,0	1.500,0	1.500,0	2.500,0
Sulfat	mg*l ⁻¹	713,6	1.507,6	100,0	2.000,0	2.000,0	5.000,0
Cyanid**	mg*l ⁻¹	0,03	0,09	0,01	0,10	0,50	1,0

*bestimmt mittels Hach-Lange Küvetten-Test LCK 345

** leicht freisetzbar, bestimmt mittels Hach-Lange Küvetten-Test LCK 319

Allgemein wird ersichtlich, dass eine deutliche Überschreitung der Zuordnungswerte bei den Parametern Glühverlust und DOC gegeben ist. Mit Ausnahme des Maximalwerts für Kupfer ist für die übrigen Parameter festzuhalten, dass unter Berücksichtigung der Zuordnungswerte einer DK II keine Überschreitungen auftreten. Hierbei ist festzuhalten, dass der aufgeführte hohe Kupfergehalt eine Ausnahme darstellt, da sich die übrigen Werte unterhalb von 2123 bzw. 700 µg*l⁻¹ bewegen. Problematisch einzustufende Parameter wie bspw. Cadmium, Quecksilber und Cyanid bieten aufgrund ihrer geringen Eluatkonzentrationen sogar eine Einstufung nach DK I. Für Arsen, Barium und

Selen wäre sogar eine Zuordnung nach DK 0 denkbar. Insgesamt ergeben sich nach Tabelle 31 ausschließlich 5 Überschreitungen der 21 Zuordnungswerte einer DK I Deponie, sodass bei erneutem Einbau der rückgebauten Abfälle von einer geringen Schadstofffreisetzung ausgegangen werden kann. In Verbindung mit den zuvor aufgezeigten geringen Anteilen an Problemabfällen ergibt sich die Schlussfolgerung, dass im näheren Umfeld der Probenahme keine Sonderabfälle bzw. gefährlichen Abfälle unwissentlich abgelagert wurden.

Neben bautechnischen Anforderungen ergibt sich aus den in Tabelle 1, Anhang 3 der Deponieverordnung [DEPV, 2009] genannten Kriterien die Möglichkeit, Abfälle als Deponieersatzbaustoffe einzusetzen. Für DK II Deponien ist der Einsatz der Feinfraktion < 35 mm nach Nummer 3 gegeben, die folgende Maßnahmen umfasst:

- Deponietechnisch notwendige Baumaßnahmen im Deponiekörper (z.B. Trenndämme, Fahrstraßen, Gaskollektoren etc.)
- Profilierung des Deponiekörpers, der Ausgleichsschicht und der Gasdränschicht des Oberflächenabdichtungssystems einer Deponie oder eines Deponieabschnitts

Problematisch gestaltet sich in diesem Zusammenhang die geforderte Reduzierung des Glühverlustes und DOCs, die nach Angaben von THOMÉ-KOZMIENSKY & PAHL [1994] durch biologische Stabilisierungsmaßnahmen und gezielte Abtrennung von Kunststoffen erfolgen könnte.

Für rückgebaute und aufbereitete Fraktionen, die diese Zuordnungswerte nicht einhalten, bietet sich nach aktuellem Recht die Möglichkeit einer erneuten Ablagerung nach § 6, Absatz 6 der DepV an. Hierin heißt es:

„Mit Zustimmung der zuständigen Behörde dürfen auch bei Überschreitung einzelner Zuordnungswerte, insbesondere des TOCs und des Glühverlustes,

- 1. abweichend von Absatz 3 Satz 1 Nummer 1 in Verbindung mit Absatz 1 Satz 1 gefährliche Abfälle aus Schadensfällen wie Brände und Naturkatastrophen auf einem gesonderten Teilabschnitt eines Deponieabschnittes der Klasse III,*
- 2. abweichend von Absatz 4 Satz 1 Nummer 2 in Verbindung mit Absatz 1 Satz 1 nicht gefährliche Abfälle aus Schadensfällen wie Brände und Naturkatastrophen auf einem gesonderten Teilabschnitt eines Deponieabschnittes der Klasse II und*
- 3. abweichend von Absatz 4 Satz 1 Nummer 3 in Verbindung mit Absatz 1 Satz 1 nicht gefährlichen Abfällen aus Schadensfällen wie Brände und Naturkatastrophen auf einem gesonderten Teilabschnitt eines Deponieabschnittes der Klasse III abgelagert werden,*

soweit zuvor eine möglichst weitgehende Aussortierung organischer Anteile erfolgt ist und das Wohl der Allgemeinheit durch die Ablagerung nicht beeinträchtigt wird. Satz 1 gilt auch

- 1. für Abfälle aus Schadensfällen, die Asbest oder andere gefährliche künstliche Mineralfasern enthalten oder vermischt mit ihnen anfallen, wenn der Nachweis erbracht wird, dass eine Abtrennung der Fasern nicht möglich oder wirtschaftlich nicht zumutbar ist oder kein anderes Entsorgungsverfahren zur Verfügung steht, sowie*
- 2. für Abfälle, die aus dem Rückbau einer Deponie oder einer Altlast nach § 2 Absatz 5 des Bundesbodenschutzgesetzes vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 9. Dezember 2004 (BGBl. I S. 3214) geändert worden ist, stammen, wenn die heizwertreichen Abfallanteile vor der Ablagerung weitgehend abgetrennt und energetisch verwertet oder thermisch behandelt werden.“*

MINERALSTOFFE > 35 MM

Die Untersuchung von Mineralstoffen > 35 mm hinsichtlich ihrer Eignung zur Verwertung außerhalb des Deponiekörpers ergibt sich aus Tabelle 32.

Das zugrunde liegende Regelwerk ist dabei die im Entwurf befindliche Ersatzbaustoff- bzw. die so genannte Mantelverordnung [ERSATZBAUSTOFFV-E, 2011], worin unterschiedliche mineralische Abfälle anhand ihrer Herkunft in Kategorien eingeteilt werden. Nach aktuellen Erkenntnissen ist die mineralische Grobfraction des Deponierückbaus der Kategorie Recycling-Baustoff (RC) zuzuordnen. Die vorgenommene Definition lautet:

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

Tiefer erfolgt eine Gliederung der Recycling-Baustoffe anhand der Materialwerte bzw. Eluatkonzentrationen in drei Einbauklassen (RC-1 bis RC-3). Aus dieser und den Eigenschaften der Grundwasserdeckschicht am Einsatzort ergeben sich definierte Einbauweisen nach Anhang 2.2 ERSATZBAUSTOFFV-E [2011]. Bei Überschreitung des Materialwertes der jeweils höchsten Einbauklasse sind entsprechende Materialien nach aktueller Definition nicht als Ersatzbaustoff einsetzbar [ERSATZBAUSTOFFV-E, 2011].

Zur Einordnung gewonnener Deponiegutproben innerhalb dieses Rasters konnten insgesamt 21 Mischproben untersucht werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 32 abgebildet.

Wie festzustellen ist, erfüllt die vorgefundene Stoffgruppe der Mineralstoffe > 35 mm mindestens alle Anforderungen zum Einsatz als Recyclingbaustoff der Kategorie 3 (RC-3). Hierbei stellt Sulfat jedoch einen limitierenden Faktor zur höherwertigen Verwertung dar. Schwermetalle wie Chrom, Kupfer, Vanadium etc. liegen hingegen weit unter den Höchstwerten der Kategorie RC-1.

Kritisch zu beurteilen ist die rechtliche Einordnung der gewonnenen mineralischen Grobfraction. Hierbei gilt es zu klären, inwieweit diese Stoffe auch bei einer Jahrzehnte lang andauernden Nachsorgephase ihren materialspezifischen Status aufrechterhalten⁷.

TABELLE 32: ERGEBNISSE DER ELUATUNTERSUCHUNGEN DER MINERALISCHEN FRAKTION > 35 MM DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

Parameter	Einheit	Kreismülldeponie Hechingen		ERSATZBAUSTOFFV-E [2011]		
		Median	MAX	RC-1	RC-2	RC-3
pH-Wert	-	8,8	9,5	6,0 - 13,0	6,0 - 13,0	6,0 - 13,0
Leitfähigkeit	$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	2.480,0	3.560,0	2.500,0	3.200,0	10.000,0
Chrom _{gesamt}	$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$	1,5	1,5	135,0	555,0	1.000,0
Kupfer	$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$	19,7	24,3	110,0	185,0	300,0
Vanadium	$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$	0,5	0,5	130,0	990,0	1.500,0
Sulfat	$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	523,3	828,5	*220,0	**300,0	3.500,0

* gilt ab 01.01.2020 - Bis dahin gilt der Wert von $350 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$

** gilt ab 01.01.2020 - Bis dahin gilt der Wert von $700 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$

⁷ „Für die Umsetzung in der ErsatzbaustoffV wird ein Güteüberwachungssystem mit materialspezifischen Untersuchungsprogrammen (Materialwerte, Anzahl der Untersuchungen, Zeitplan und Testmethoden) zur Bestimmung und Zuordnung der Materialqualität rechtsverbindlich. Das Güteüberwachungssystem basiert auf einem ausführlichen Säulenversuch nach DIN 19528 (2009) für den Eignungsnachweis (Basischarakterisierung) und der erweiterten Fremdüberwachung und auf dem Säulenkurztest bis WF 2 nach DIN 19528 (2009) für die regelmäßige werkseigene Produktionskontrolle und regelmäßige Fremdüberwachung“ [SUSSET ET AL., 2010].

5.3.2 ENERGETISCHE VERWERTUNG

PPK, Kunststoffe, Holz, Textilien, kompl. Produkte, Stoffe ang. und Sortierreste eignen sich aufgrund ihres hohen Energiegehaltes prinzipiell zur energetischen Verwertung. Laut KREISLAUFWIRTSCHAFTS- UND ABFALLGESETZES [2009] ist die Anforderung an den Heizwert wie folgt zu definiert:

„Abfälle können zur Gewinnung von Energie genutzt werden ..., wenn der Heizwert des einzelnen Abfalls, ohne Vermischung mit anderen Stoffen, mindestens $11.000 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ beträgt.“

Zur Abschätzung des energetischen Potenzials der Kreismülldeponie Hechingen wird in diesem Zusammenhang auf empirische Formeln der Heizwertberechnung zurückgegriffen. Die hierzu benötigte stoffspezifische elementare Zusammensetzung ist in diesem Zusammenhang Literaturangaben entnommen. Abbildung 129 zeigt die mittleren prozentualen Anteile der einzelnen Stofffraktionen an der gesamten heizwertreichen Fraktion.

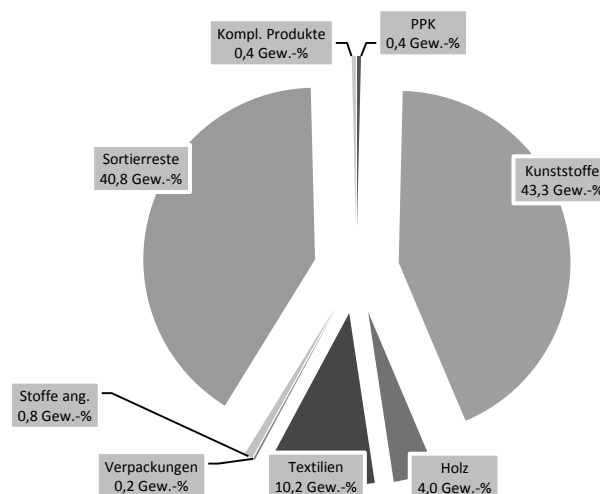


ABBILDUNG 129: ANTEIL EINZELNER STOFFFRAKTIONEN AN DER HEIZWERTREICHEN FRAKTION [Gew.-% TM]

Die nach MICHEL [1938], COPPER ET AL. [1999] und NELLES [1998] errechneten mittleren Heizwerte der Stofffraktionen sind Abbildung 130 zu entnehmen. Es wird deutlich, dass die Heizwerte der Fraktionen Kunststoffe, Verpackungen und Sortierreste unter Berücksichtigung des ermittelten Wassergehalts und Glühverlusts den geforderten Mindestwert von $11.000 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ überschreiten. Nahezu identische Heizwerte von ca. $8.000 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ weisen die Stoffgruppen Textilien und Stoffe ang. (überwiegend Hygieneprodukte) auf. Dies ist durch ähnliche Verhältnisse von C, H und O in der elementaren Zusammensetzung zu erklären, wobei beide Fraktionen aus ca. einem Drittel Kunststoffen und zwei Dritteln Cellulose bestehen [KOST, 2001].

Feuchtes Holz besitzt einen mittleren Heizwert von $6.300 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Aufgrund des hohen Wassergehalts der PPK-Fraktion erreicht diese ausschließliche Werte im Bereich von $4.500 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Weitere Berechnungen zeigen, dass die stoffspezifische Reduktion des Wassergehalts auf 30 Gew.-% dazu führt, dass, mit Ausnahme der Fraktion PPK, alle Stofffraktionen über dem Mindestheizwert von $11 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ liegen. Im Fall von PPK ist zur Einhaltung der Bedingungen zur energetischen Verwertung eine Reduzierung des Wassergehaltes auf 20 Gew.-% notwendig.

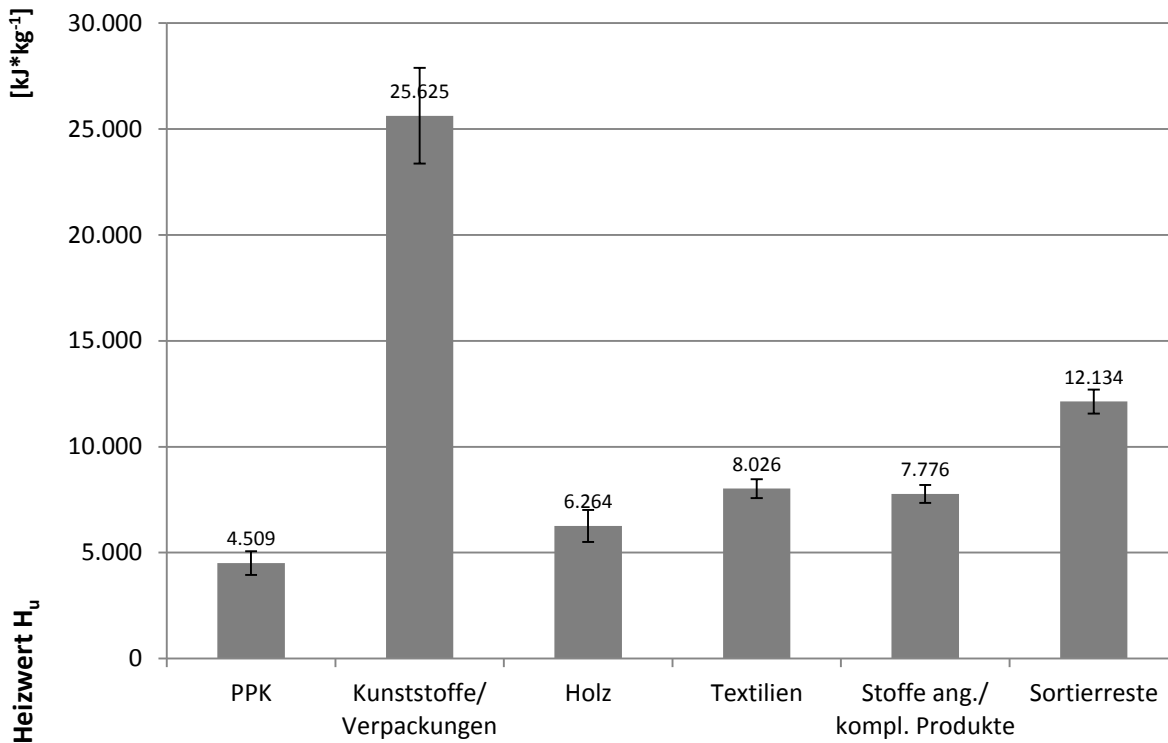


ABBILDUNG 130: ERRECHNETE MITTLERE HEIZWERTE DER STOFFFRAKTIONEN

Auf Basis der mittleren stoffspezifischen Heizwerte kann in Verbindung mit der durchschnittlichen Zusammensetzung der heizwertreichen Fraktion die Abschätzung des theoretischen Gesamtheizwertes erfolgen. Dabei ist zu erkennen, dass bereits die Ausgangssubstanz mit im Mittel $17.300 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ die kalorischen Anforderungen erfüllt. Notwendige Aerobisierungsmaßnahmen lassen zudem vermuten, dass bei einem großtechnischen Deponierückbau geringere Wassergehalte erzielt werden können und hieraus höhere Heizwerte resultieren sollten.

Der Gesamtheizwert der Kreismülldeponie Hechingen kann derzeit auf ca. 9,2 bis 10,8 Mio. GJ geschätzt werden (siehe Anhang 106 und 107).

Neben den kalorischen Eigenschaften bestimmen weitere Faktoren die Eignung der heizwertreichen Fraktion als Ersatzbrennstoff. Hierzu zählen insbesondere die Gehalte an Schwermetallen und Chlor.

Die gewonnenen Ergebnisse der Schwermetalluntersuchung und die berechneten Chlorgehalte sind in Tabelle 33 enthalten. Zur näheren Charakterisierung sind hierneben die Anforderungen potenzieller Abnehmer und der RAL-GZ (Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe) abgebildet.

TABELLE 33: ERGEBNISSE DER SCHWERMETALLANALYTIK SOWIE DIE BERECHNETEN CHLORGEHALTE DER HEIZWERTREICHEN FRAKTION IM VERGLEICH ZU DEN ANFORDERUNGEN DER EBS-ABNEHMER

Parameter	Einheit	Messwerte		EBS-Kraftwerk*	Zementwerke**	RAL-GZ 724	
		MW	MAX	Maximalwert	Maximalwert	Median	80 % Perzentil
Chlorgehalt	Gew.-% TM	1,6	1,8	2,0	1,0	Dokumentation	Dokumentation
Cadmium	mg*kg ⁻¹ TM	8,3	18,7	20,0	9,0	4,0	9,0
Quecksilber	mg*kg ⁻¹ TM	0,8	0,8	2,0	1,2	0,6	1,2
Thallium	mg*kg ⁻¹ TM	0,1	0,1	20,0	2,0	1,0	2,0
Arsen	mg*kg ⁻¹ TM	6,6	8,9	20,0	13,0	5,0	13,0
Kobalt	mg*kg ⁻¹ TM	10,9	17,7	30,0	12,0	6,0	12,0
Nickel	mg*kg ⁻¹ TM	60,7	66,5	200,0	100,0	80,0	160,0
Selen	mg*kg ⁻¹ TM	< 5,0	< 5,0	k.A.	5,0	3,0	5,0
Tellur	mg*kg ⁻¹ TM	< 5,0	< 5,0	k.A.	5,0	3,0	5,0
Antimon	mg*kg ⁻¹ TM	33,7	45,8	500,0	60,0	25,0	60,0
Blei	mg*kg ⁻¹ TM	269,2	528,3	400,0	200,0	190,0	-
Chrom	mg*kg ⁻¹ TM	148,0	161,9	400,0	120,0	125,0	250,0
Kupfer	mg*kg ⁻¹ TM	378,4	396,7	1.000,0	300,0	350,0	-
Mangan	mg*kg ⁻¹ TM	420,9	510,5	400,0	125,0	250,0	500,0
Vanadium	mg*kg ⁻¹ TM	32,9	40,9	80,0	25,0	10,0	25,0
Zinn	mg*kg ⁻¹ TM	80,5	127,5	150,0	70,0	30,0	70,0
Beryllium	mg*kg ⁻¹ TM	0,1	0,2	k.A.	2,0	0,5	2,0

* [EcoENERGY GMBH, 2006]

** [BECKMANN & NCUBE, 2007]

Es wird deutlich, dass die heizwertreiche Fraktion die Anforderungen von EBS-Kraftwerken erfüllt. Lediglich die Parameter Blei und Mangan überschreiten die Höchstwerte unter Annahme der gemessenen Höchstkonzentration. Die berechneten Chlorgehalte liegen ebenfalls unter der zulässigen Höchstgrenze, sodass insgesamt kein limitierender Faktor vorliegt.

Hochwertigere Verwertungswege wie z.B. in Zementwerken scheinen jedoch nicht möglich. Neben einer Vielzahl der gemessenen Schwermetallkonzentrationen stellt in diesem Fall vor allem die Überschreitung des maximal zulässigen Chlorgehalts ein Problem dar.

Ein ähnliches Bild zeigt sich in Bezug auf die Richtwerte der RAL-GZ. Auch hier sind die Grenzwerte vielfach überschritten.

5.4 PREISENTWICKLUNG AUSGEWÄHLTER PRIMÄR- UND SEKUNDÄRROHSTOFFE

Entscheidender Faktor für die Wirtschaftlichkeit von Deponierückbauprojekten ist neben dem zu erwartenden Vorkommen an Rohstoffen auch deren zukünftiger Absatzpreis.

Hierbei werden nachfolgend die zeitspezifischen Entwicklungen ausgewählter Industriemetalle betrachtet, die entsprechend den Potenzialanalysen in bedeutenden Mengen auf der Kreismülldeponie Hechingen zu vermuten sind.

5.4.1 EISENERZ UND STAHLSCROTT

Abbildung 131 zeigt für den Zeitraum Januar 2001 bis Januar 2011 die Entwicklung der monatlichen Durchschnittspreise für Eisenerz und Stahlschrott.

Dabei besitzen beide abgeleiteten Trendfunktionen eine positive Steigung, was bedeutet, dass sowohl die Preise für Eisenerz als auch für Stahlschrott in Zukunft steigen werden. Für Stahlschrott kann die Preisentwicklung nach folgender Formel beschrieben werden. Der Zusammenhang ist mit $R^2 = 53\%$ gut einzustufen.

FORMEL 20: TRENDFUNKTION DER PREISENTWICKLUNG VON STAHLSCROTT

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

Mit:

Marktpreis: [$\text{€} * \text{Mg}^{-1}$]

x : Prognosezeitpunkt [Ganzzahl]*

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

Die Gegenüberstellung beider Preise wird aus Abbildung 132 ersichtlich. Auch hier zeigt sich eine deutliche Korrelation. Demnach liegt der Preis für Stahlschrott etwa um das 1,5-fache höher als der Eisenerzpreis.

Aktuell können für Stahlschrott Erlöse in Höhe von 250 bis 300 $\text{€} * \text{Mg}^{-1}$ erzielt werden [EUWID, 2011].

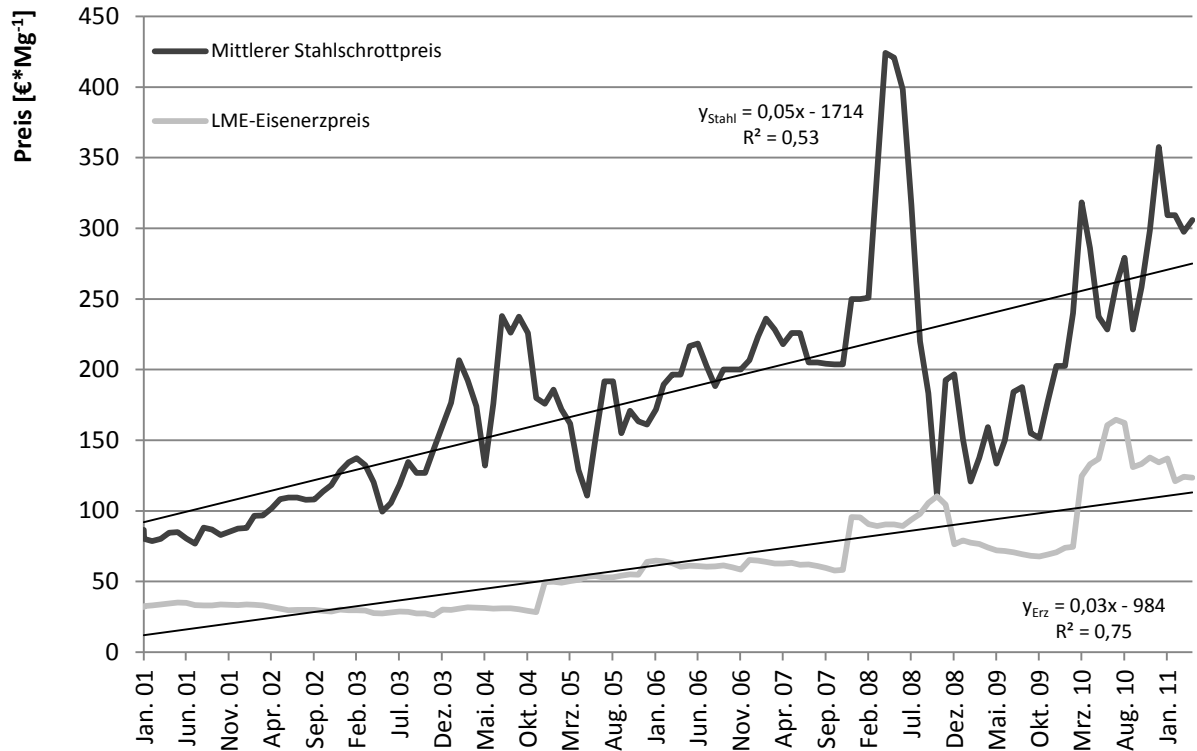


ABBILDUNG 131: PREISENTWICKLUNG FÜR STAHLSCROTT UND EISENERZ IM VERLAUF DES ZEITRAUMS JANUAR 2001 BIS JANUAR 2011

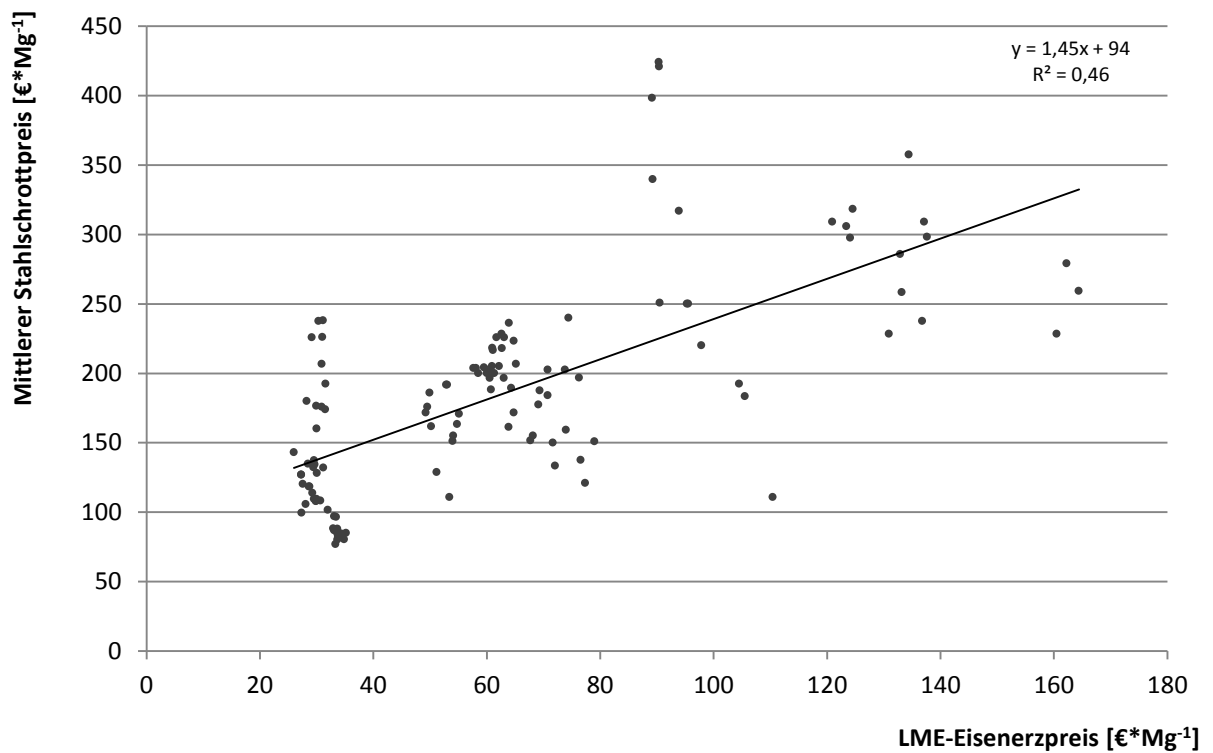


ABBILDUNG 132: ZUSAMMENHANG DES STAHLSCROTT- UND EISENERZPREISES

5.4.2 KUPFER

Im Vergleich zu Stahlschrott und Eisenerz beschreiben die Preisentwicklungen für Primärkupfer und Kupferschrott mit $R^2 = 98 \%$ einen deutlich engeren Zusammenhang. Es wird ersichtlich, dass die durchschnittlichen Preise für Kupferschrott etwa 17 % unterhalb denen des Primärrohstoffs liegen (Abbildung 134).

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

FORMEL 21: TRENDFUNKTION DER PREISENTWICKLUNG VON KUPFERSCHROTT

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

Mit:

Marktpreis: [€*Mg⁻¹]

x: Prognosezeitpunkt [Ganzzahl]*

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

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

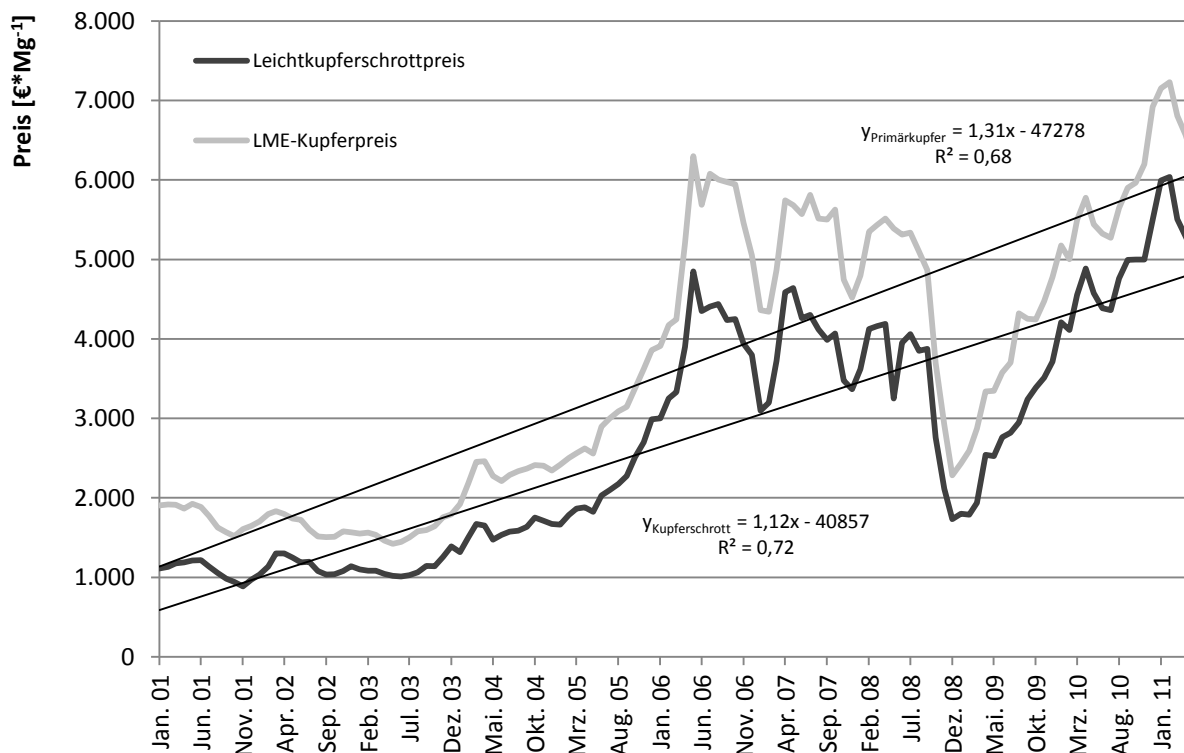


ABBILDUNG 133: PREISENTWICKLUNG FÜR KUPFERSCHROTT UND PRIMÄRKUPFER IM VERLAUF DES ZEITRAUMS JANUAR 2001 BIS JANUAR 2011

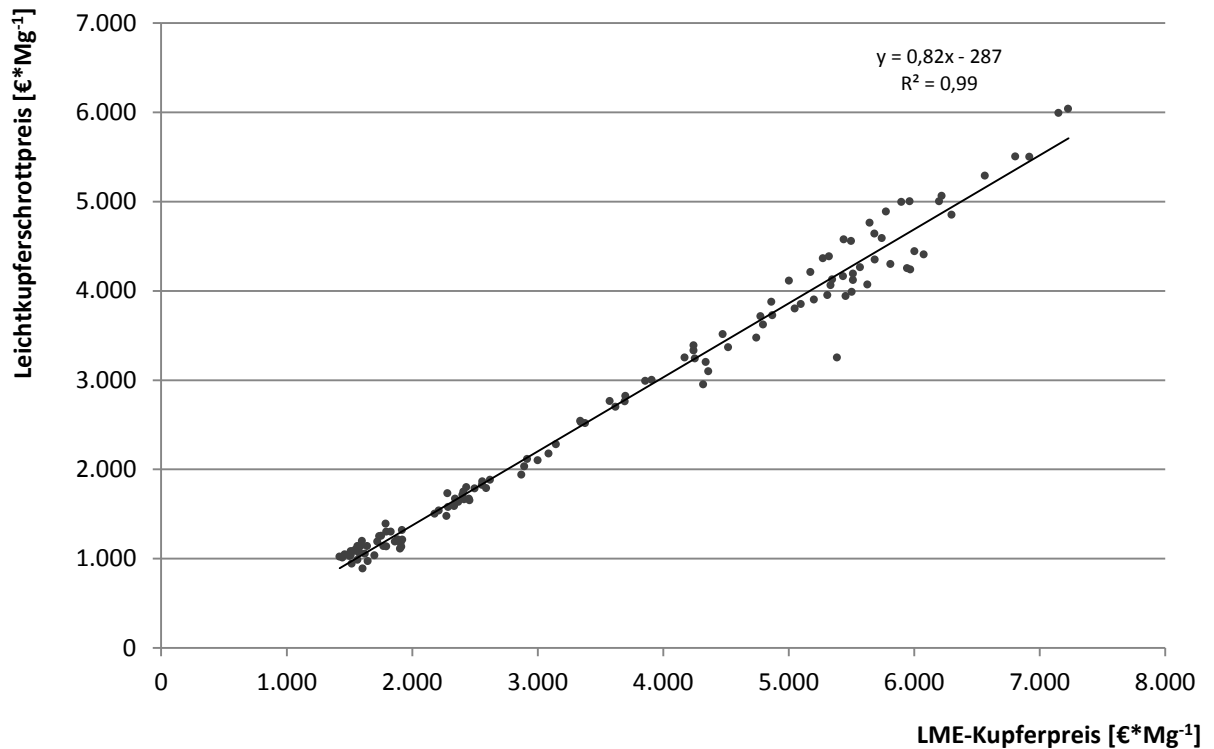


ABBILDUNG 134: ZUSAMMENHANG DES KUPFERSCHROTT- UND PRIMÄRKUPFERPREISES

5.4.3 ALUMINIUM

Neben Kupfer tritt als NE-Metall in Deponien vorwiegend Aluminium auf. Die zeitliche Betrachtung der Preisentwicklung lässt hierbei keinen Trend erkennen. Dies bedeutet, dass in Zukunft mit vergleichsweise geringen Preisanstiegen zu rechnen ist, was durch ein Steigungsmaß von 0,04 zum Ausdruck kommt (Abbildung 135).

FORMEL 22: TRENDFUNKTION DER PREISENTWICKLUNG VON ALUMINIUMSCHROTT

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

Mit:

Marktpreis: [€*Mg⁻¹]

x: Prognosezeitpunkt [Ganzzahl]*

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

Einen guten Zusammenhang beschreibt hingegen Abbildung 136. Demnach liegt bei einem Bestimmtheitsmaß von 79 % der Preis für Sekundäraluminium etwa um die Hälfte unter dem für Primäraluminium.

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

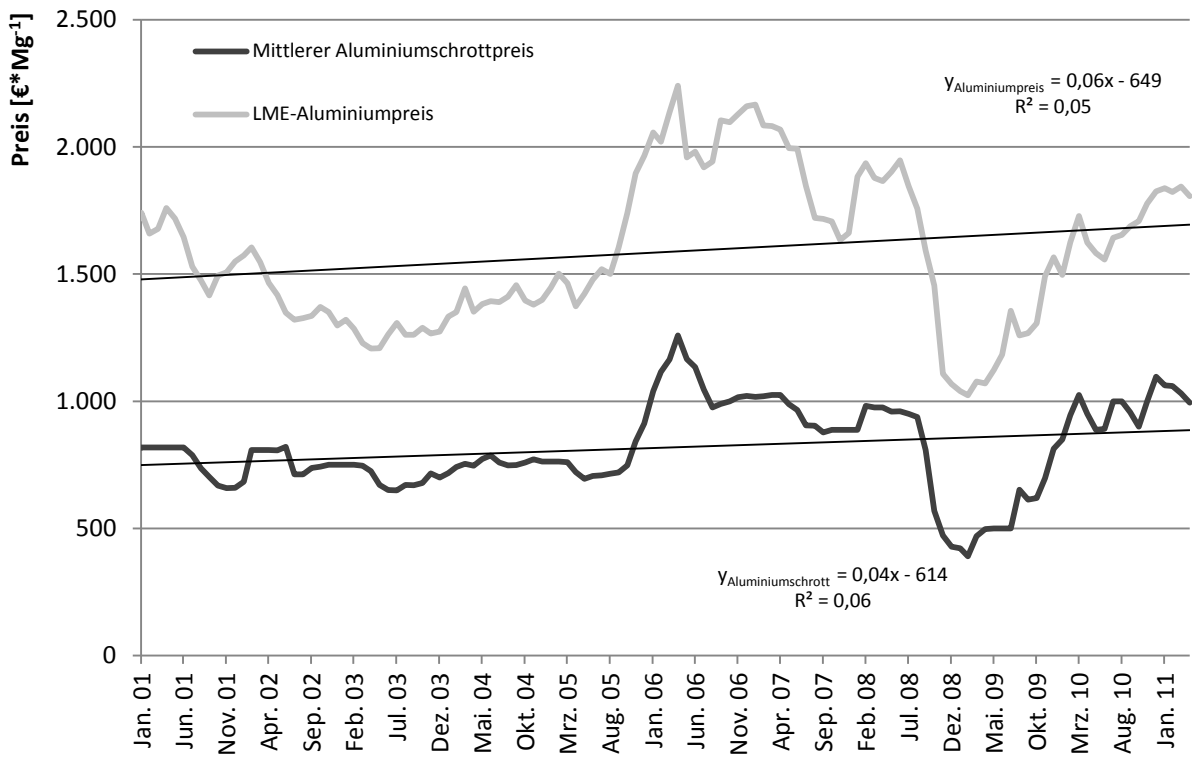


ABBILDUNG 135: PREISENTWICKLUNG FÜR ALUMINIUMSCHROTT UND ALUMINIUM IM VERLAUF DES ZEITRAUMS JANUAR 2001 BIS JANUAR 2011

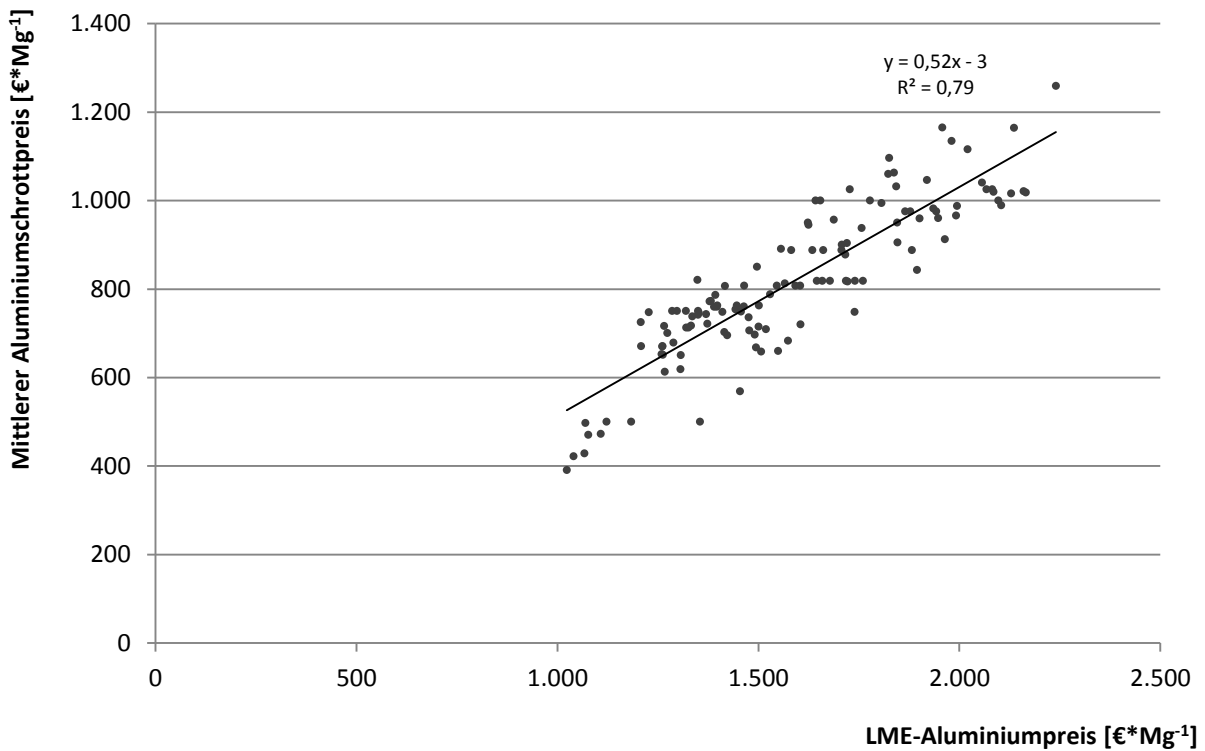


ABBILDUNG 136: ZUSAMMENHANG DES ALUMINIUMSCHROTT- UND ALUMINIUMPREISES

5.4.4 PREISPROGNOSEN

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

Ausgehend von Formel 20 bis Formel 22 lassen sich für einen Prognosezeitraum von 50 Jahren, die in Abbildung 137 bis Abbildung 139 aufgezeigten Preisentwicklungen ableiten. Hierbei wird zudem von einer jährlichen positiven und negativen Preisabweichung von 5 % ausgegangen.

Es wird deutlich, dass sich unter diesen Annahmen die Marktpreise für Stahlschrott in etwa 20 Jahren verdoppelt haben werden. Dies bedeutet, dass im Jahr 2030 mit Preisen von ca. 630 bis 650 €*Mg⁻¹ zu rechnen ist. Diese liegen somit nur knapp unterhalb der aktuellen Aluminiumschrottpreise.

Der Aluminiumschrottpreis wird sich im gleichen Zeitraum ebenfalls steigern. Die potenzielle Steigerungsrate fällt jedoch geringer aus, sodass im Jahr 2030 mittlere Preise von 1.200 €*Mg⁻¹ zu erwarten sind. Im Jahr 2060 werden diese nach Annahme dieser Prognose sogar die 1.500 € Marke übersteigen.

Die drastischsten Preissteigerungen zeigen sich für Kupferschrott. Im Jahr 2030 ist mit Preisen zu rechnen, die um etwa das 1,6-fache höher liegen als aktuell. Dies bedeutet, dass für 1 Mg Kupferschrott 13.000 bis 13.500 € erzielt werden könnten. Im Jahr 2060 wären es sogar 24.000 bis 26.000 €*Mg⁻¹.

Insgesamt ist zu berücksichtigen, dass mit zunehmender Prognosedauer eine Minderung der Aussagekraft einhergeht. Dennoch bieten diese Modelle eine Abschätzung zur Einordnung der zukünftigen Preisentwicklung auf den internationalen Rohstoffmärkten und dienen daher im Weiteren als Grundlage zur Bewertung des Rohstoffpotenzials der Kreismülldeponie Hechingen.

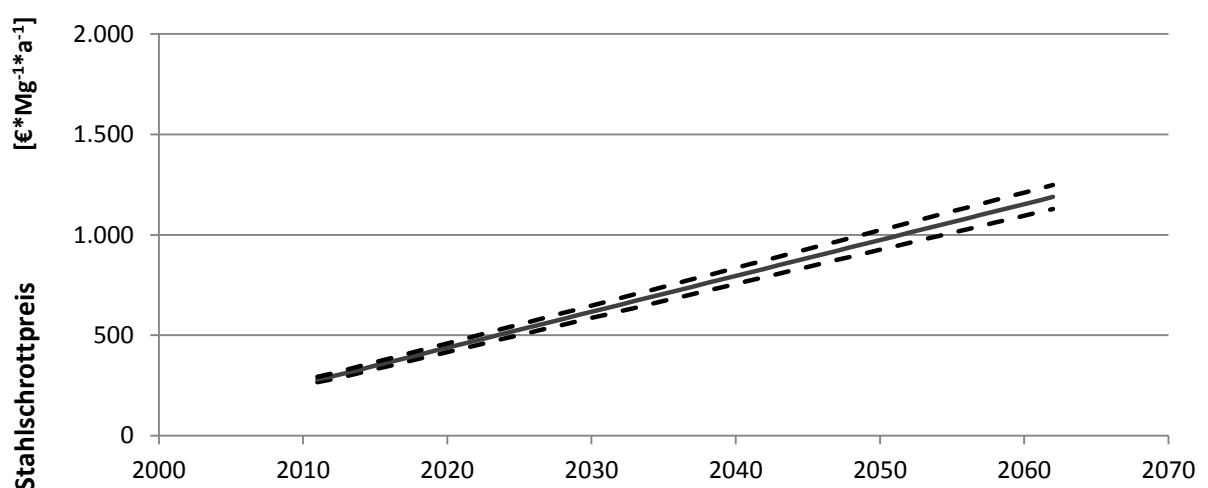


ABBILDUNG 137: PROGNOSTIZIERTE STAHLSCHROTTPREISENTWICKLUNG BIS ZUM JAHR 2062

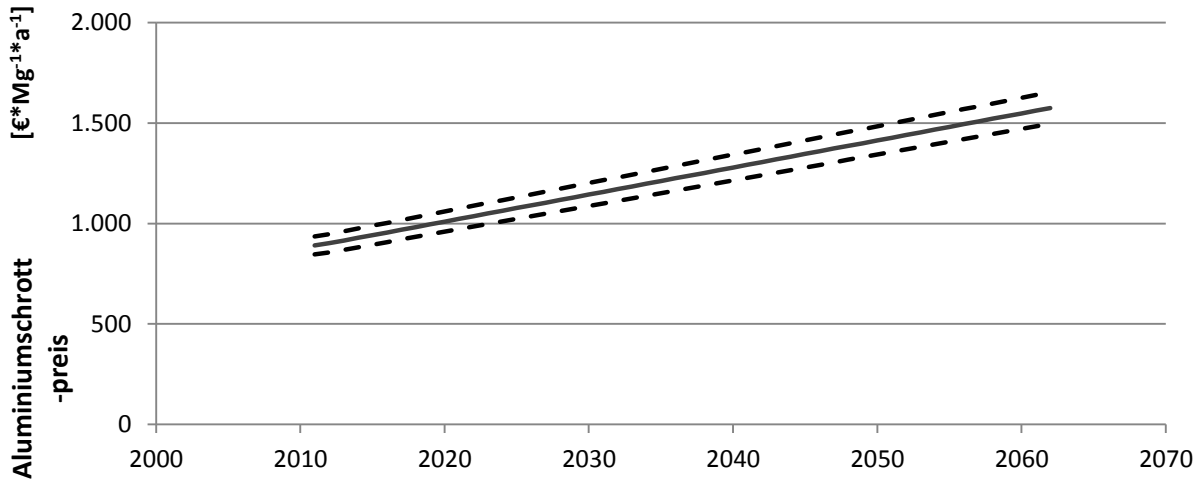


ABBILDUNG 138: PROGNOTIZIERTE ALUMINIUMSCHROTTPREISENTWICKLUNG BIS ZUM JAHR 2062

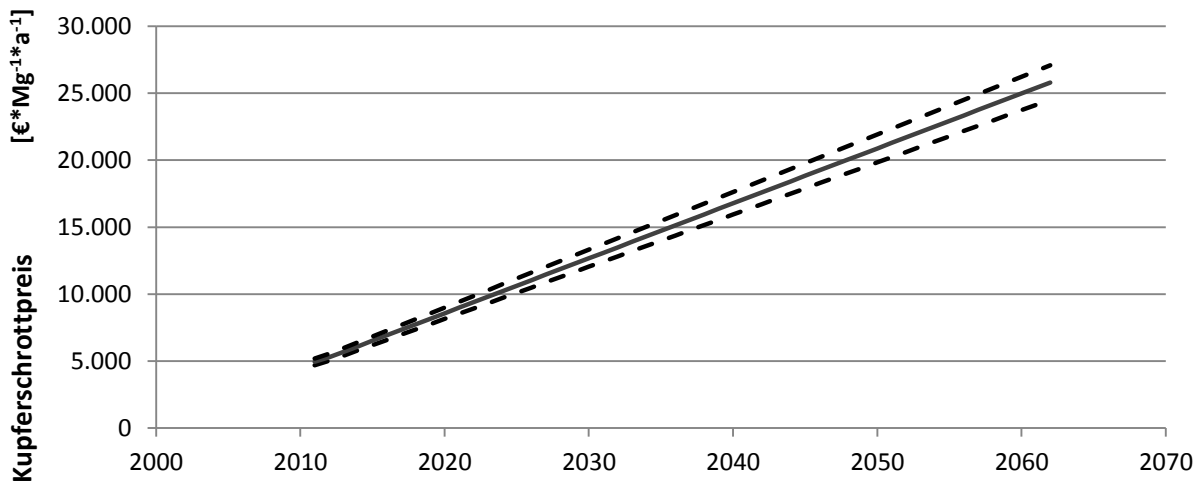


ABBILDUNG 139: PROGNOTIZIERTE KUPFERSCHROTTPREISENTWICKLUNG BIS ZUM JAHR 2062

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

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

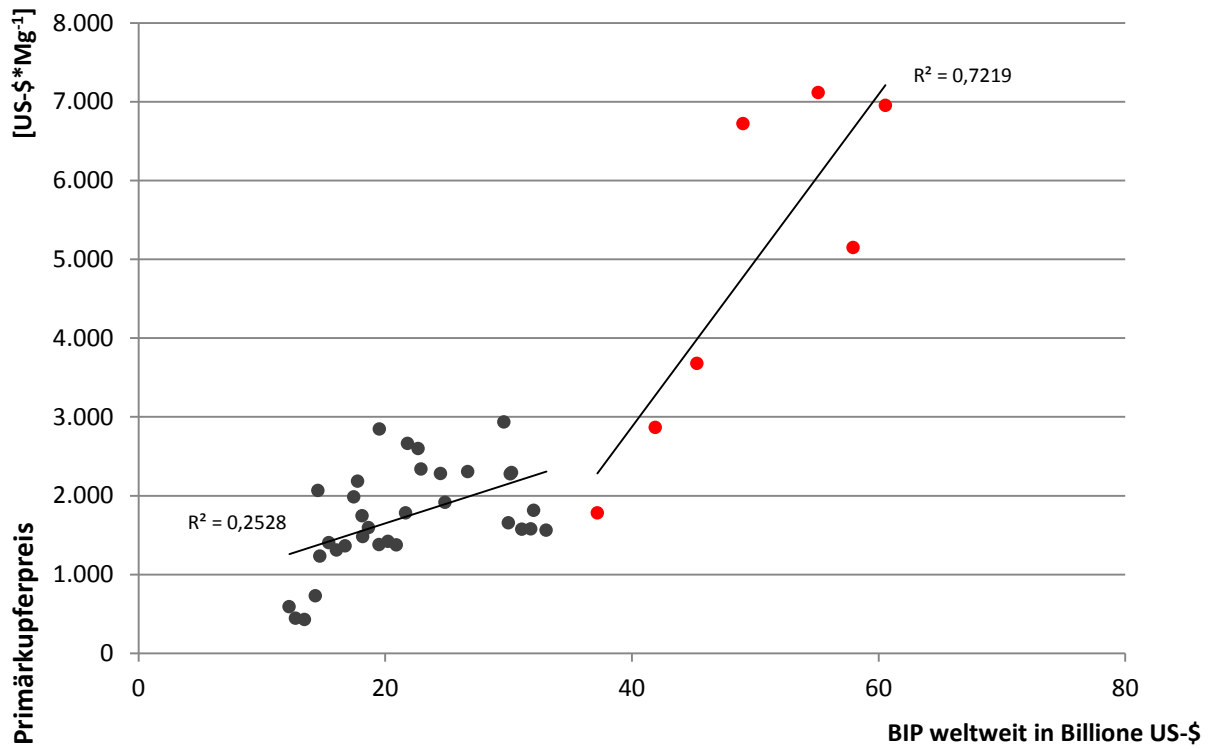


ABBILDUNG 140: ENTWICKLUNG DES PRIMÄRKUPFERPREISSES IN ABHÄNGIGKEIT DES BRUTTOINLANDSPRODUKTES WELTWEIT VON 1970 – 2002 (DUNKELGRAU) UND 2003 – 2009 (ROT)

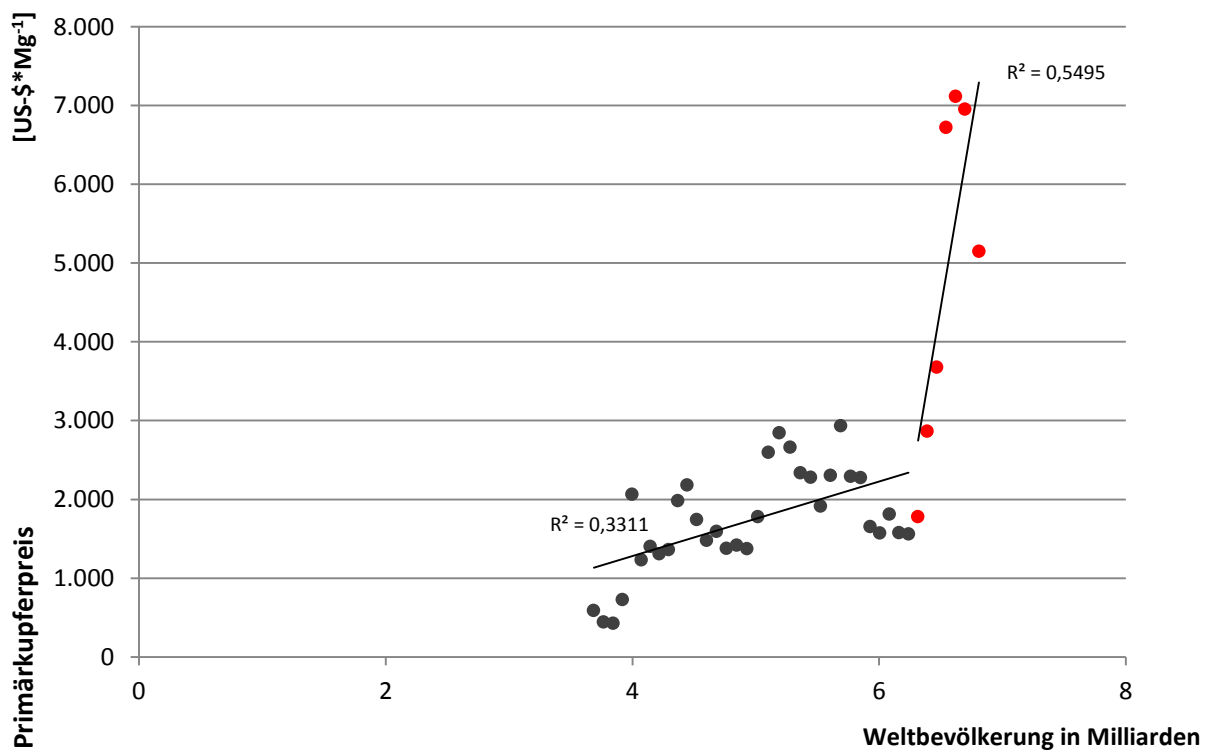


ABBILDUNG 141: ENTWICKLUNG DES PRIMÄRKUPFERPREISSES IN ABHÄNGIGKEIT DER WELTBEVÖLKERUNG VON 1970 – 2002 (DUNKELGRAU) UND 2003 – 2009 (ROT)

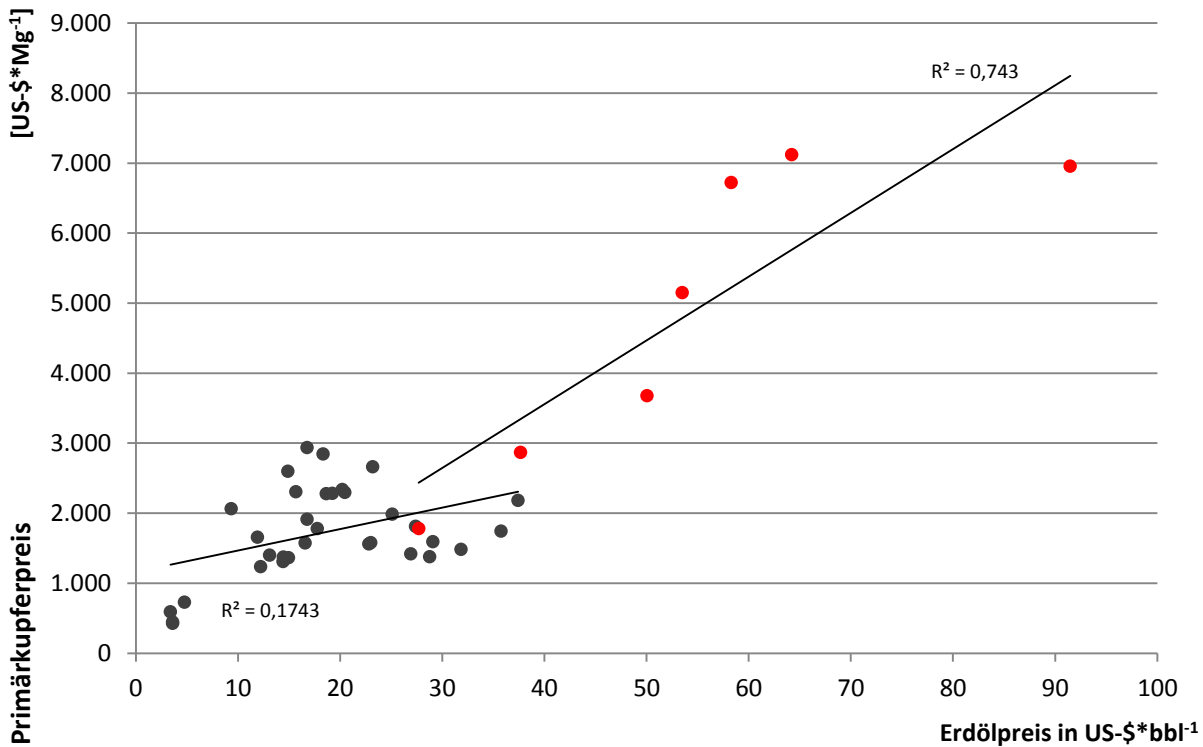


ABBILDUNG 142: ENTWICKLUNG DES PRIMÄRKUPFERPREISES IN ABHÄNGIGKEIT DES ERDÖLPREISES VON 1970 – 2002 (DUNKELGRAU) UND 2003 - 2009 (ROT)

Allen gezeigten Abbildungen ist gemein, dass sie eine positive Steigung für den Marktpreis von Kupfer ausweisen. Dies bedeutet, dass mit steigenden preisbestimmenden Faktoren auch eine Preissteigerung für Industrierohstoffe einhergehen wird.

Wie zu erkennen ist, hat sich diese Situation für den betrachteten Zeitraum 2003 – 2009 gegenüber den vorherigen Jahren deutlich verschärft. In diesem Zusammenhang werden unter anderem von IFW [2009], INPEOS [2010], SINDING [2007], NÖTSTALLER & WAGNER [2007], DSW [2011], ECB [2004] sowie FOLLATH & JUNG [2008] zukünftig drastische Erhöhungen dieser Faktoren gesehen.

Neben den aufgezeigten Trendanalysen zeigen auch die Zusammenhänge zu preisbestimmenden Wirtschaftsfaktoren eine deutliche Zunahme zukünftiger Rohstoffpreise. Demnach kann im Rahmen der Modellierung davon ausgegangen werden, dass sich die Preise für Eisen- und Nichteisenmetalle in der beschriebenen Form entwickeln werden.

5.5 ÖKOLOGISCHE UND ÖKONOMISCHE BETRACHTUNG

5.5.1 CO₂-EINSPARUNG

Durch den Einsatz sekundärer Rohstoffe können die Emissionen an klimaschädlichem CO₂ maßgeblich gesenkt werden. Hierzu gibt Tabelle 34 einen Überblick über spezifische Einsparpotenziale. In Abhängigkeit der jeweils eingesetzten Technik können diese Werte variieren [UMSICHT, 2008].

TABELLE 34: SPEZIFISCHE CO₂-EINSPARUNG DURCH DAS RECYCLING EINZELNER STOFFFRAKTIONEN

Fraktion	Mg CO ₂ *Mg ⁻¹ Input		MW
	von	bis	
Stahl	0,817	0,903	0,86
Aluminium	9,376	10,363	9,87
Kupfer	3,344	3,696	3,52
PPK	0,085	0,094	0,09
Holz	0,731	0,808	0,77
Kunststoffe	1,805	1,905	1,855

Unter Berücksichtigung der modellierten stoffspezifischen Rohstoffpotenziale ergeben sich die in Abbildung 143 aufgezeigten CO₂-Einsparpotenziale.

Hierbei wird deutlich, dass vor allem die Fraktion der Kunststoffe einen wesentlichen Beitrag zum aktiven Klimaschutz leistet. Daneben treten das Recycling von Aluminium, Stahlschrott und Holz in den Vordergrund dieser Betrachtung.

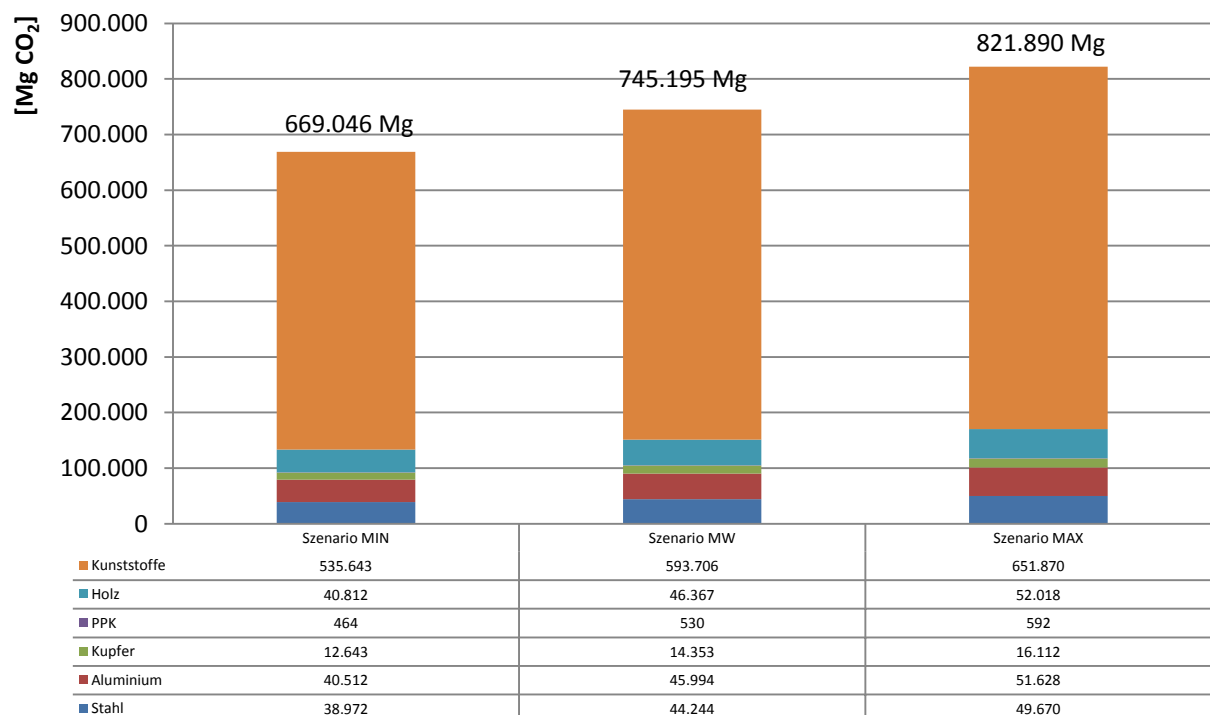


ABBILDUNG 143: CO₂-EINSPARPOTENZIALE DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN (VERGL. ANHANG 105)

Der aktuelle Emissionshandel zeigt in diesem Zusammenhang CO₂-Zertifikatspreise von 10 bis 15 €*Mg⁻¹ [AVANTTIME CONSULTING GMBH, 2011; WOLFGARTEN, 2011]. Demnach ist für das CO₂-Einsparpotenzial der Kreismülldeponie ein theoretischer Gegenwert von 6 bis 12 Mio. € anzusetzen.

5.5.2 METALLVERMARKTUNG

Derzeit stellen die Fe- und NE-Metalle erlösbringende Wertstofffraktionen dar, deren zukünftige Preisentwicklung im Vorfeld abgeleitet wurde. Unter Einbindung der beim Rückbau der Kreismülldeponie Hechingen zu erwartenden Metallmenge ergeben sich unter aktuellen Marktbedingungen Erlöse in Höhe von 35 – 54 Mio. € (Abbildung 144).

Hierbei werden die in Tabelle 35 genannten Annahmen getroffen. Die Einschätzung der Anteile an Aluminium, Kupfer und sonstigen Metallen an den NE-Metallen beruht auf Erkenntnissen, die während der Sortierungen gewonnen wurden. Für den Marktpreis der sonstigen Metalle wird in diesem Fall der modellierte Stahlschrottpreis angenommen.

TABELLE 35: FE-METALLGEHALTE DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN UND CHARAKTERISIERUNG DER NE-METALLE

		Einheit	Rohstoffpotenzial		
			MIN	MW	MAX
Fe-Metalle		Mg TM	47.701	51.447	55.005
NE-Metalle		Mg TM	10.802	11.650	12.455
Gesamt		Mg TM	58.503	63.097	67.460
Annahmen I					
Anteile	Al	Gew.-% TM	45	45	45
Anteile	Cu	Gew.-% TM	50	50	50
Anteile	Sonstiges	Gew.-% TM	5	5	5
Absolut	Al	Mg TM	4.861	5.243	5.605
Absolut	Cu	Mg TM	5.401	5.825	6.228
Absolut	Sonstiges	Mg TM	540	583	623
Summe		Mg TM	10.802	11.650	12.455
Annahmen II					
Anteile	Al	Gew.-% TM	40	40	40
Anteile	Cu	Gew.-% TM	35	35	35
Anteile	Sonstiges	Gew.-% TM	15	15	15
Absolut	Al	Mg TM	4.321	4.660	4.982
Absolut	Cu	Mg TM	3.781	4.078	4.359
Absolut	Sonstiges	Mg TM	2.701	2.913	3.114
Summe		Mg TM	10.802	11.650	12.455

Bis zum Jahr 2030 steigen die mittleren Wertschöpfungspotenziale auf ein Niveau von 90 bis 112 Mio. €. Am Ende des Betrachtungszeitraums könnten unter den genannten Randbedingungen etwa 173 bis 217 Mio. € aus der Metallverwertung gewonnen werden.

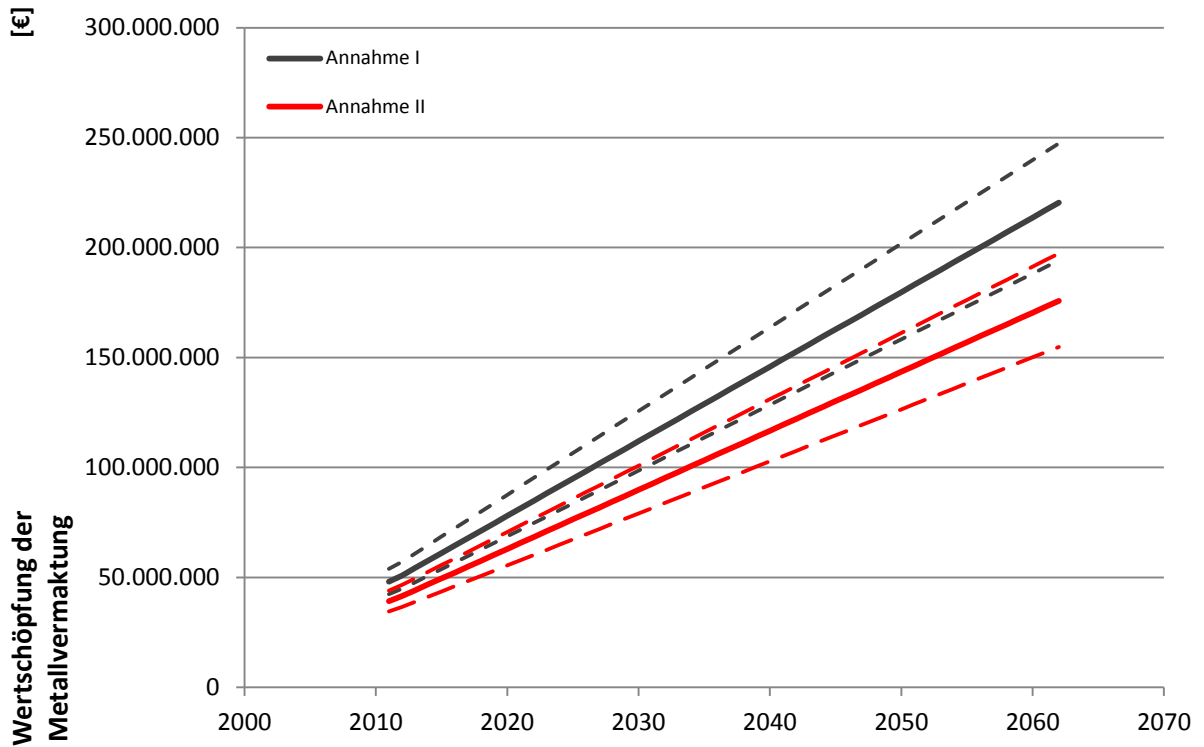


ABBILDUNG 144: POTENZIELLE WERTSCHÖPFUNG DER METALLVERMARKTUNG

5.5.3 ENERGIEGEHALT

Der Gesamtenergiegehalt der Kreismüldeponie kann mit 9,2 bis 10,8 Mio. GJ beziffert werden. Unter der Annahme, dass Kohle ein energetisches Potenzial von 29,3 GJ*Mg⁻¹ besitzt und das Gesamtpotenzial vollständig ausgenutzt werden könnte, könnten insgesamt 317.000 bis 368.000 Mg Kohle substituiert werden. Zudem werden 855.000 bis 995.000 Mg CO₂ eingespart, die einem mittleren monetärem Wert von 10,6 bis 12,4 Mio. € entsprechen (CO₂-Zertifikatspreisspanne: 10 - 15 €*Mg⁻¹).

Nach HÖLZLE [2011] reicht der Heizwert alleine nicht aus, um das energetische Potenzial rückgebauter Abfälle zu bewerten. Ursache hierfür ist, dass unterschiedliche heizwertreiche Fraktionen in verschiedenen Kraftwerken mit differenzierten Wirkungsgraden verwendet werden. Diese reichen je nach technischer Ausstattung von 30 bis 90 % und schwanken somit stark. Einen Überblick hierzu vermittelt Tabelle 36.

TABELLE 36: WIRKUNGSGRAD EUNTERSCHIEDLICHER KRAFTWERKE [HÖLZLE, 2011]

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

Unter Berücksichtigung dieser Kenngrößen ergeben sich für die energetische Bewertung der Kreismülldeponie Hechingen die in Abbildung 145 aufgezeigten Werte. Demnach können maximal 8,2 bis 9,7 Mio. GJ des Gesamtenergiegehalts energetisch umgesetzt werden.

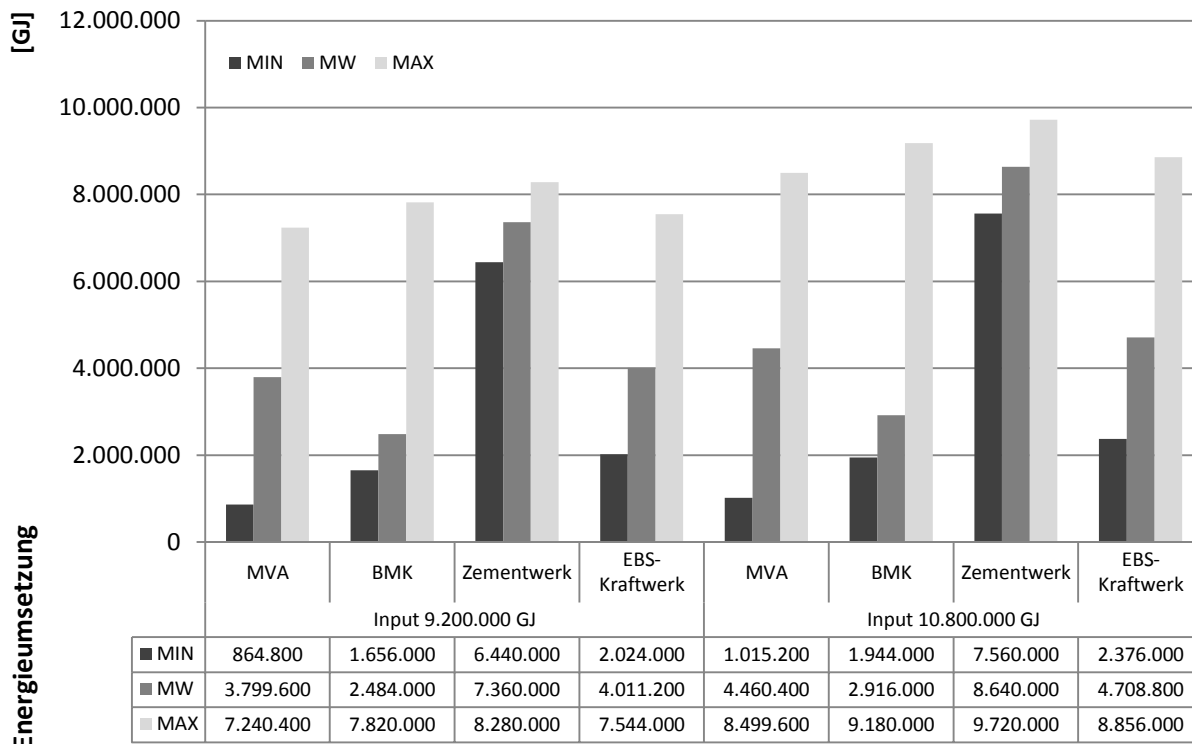


ABBILDUNG 145: ENERGETISCHE BETRACHTUNG DER HEIZWERTREICHEN FRAKTION UNTER BEACHTUNG UNTERSCHIEDLICHER WIRKUNGSGRAD E BEI DER ENERGIEERZEUGUNG

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

Eine in Verbindung mit dem Recyclingunternehmen Korn [KORN, 2011] erstellte Bilanzierung kommt zum Ergebnis, dass zur Aufbereitung von einer Tonne Deponiegut ca. 0,14 GJ Energie benötigt werden (Bilanzierung siehe Anhang 108).

Demnach werden für die eigentliche Herstellung einer heizwertreichen Fraktion weitere 213.000 bis 427.000 GJ Energie benötigt, die im Rahmen der Bilanzierung zu berücksichtigen sind. Diese machen ca. 2,3 bis 4,6 % des Gesamtenergiegehalts aus.

5.5.4 KOSTEN DES RÜCKBAUS

Die Kosten des Rückbaus der Kreismülldeponie werden aus Tabelle 37 und Abbildung 146 ersichtlich. Als Berechnungsgrundlage dienen in diesem Zusammenhang spezifische Literaturangaben sowie zwei eigene Annahmen.

Hauptunterschied beider Annahmen liegt darin, dass im Fall von Annahme 1 davon ausgegangen wird, dass die Feinfraktion und ähnliche Materialien einer MVA-Anlage zugeführt werden.

Annahme 2 geht hingegen davon aus, dass diese Materialien in einer MBA entsorgt werden. Aufgrund der daraus resultierenden höheren Entsorgungskosten belaufen sich die Gesamtkosten der Annahme 2 auf 239 Mio. €. Dies entspricht spezifischen Rückbaukosten von ca. 112 €*Mg⁻¹ rückgebauter Abfall. Annahme 1 hat zum Ergebnis, das der Rückbau der Kreismülldeponie Gesamtkosten in Höhe von etwa 210 Mio. € verursacht. Die spezifischen Kosten sind demnach mit ca. 98 €*Mg⁻¹ Deponiegut anzusetzen.

TABELLE 37: KOSTEN DES RÜCKBAUS DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

Rückbaukosten*	Spezifische Kosten	Deponiegut-masse Annahme 1	Rückbaukosten Annahme 1	Deponiegut-masse Annahme 2	Rückbaukosten Annahme 2
	€*Mg ⁻¹ FM	Mg FM	€	Mg FM	€
Aufnahme	5	2.133.638	10.668.189 €	2.133.638	10.668.189 €
Aufbereitung	10	2.133.638	21.336.379 €	2.133.638	21.336.379 €
Entsorgung MVA Material	90	1.080.157	97.214.140 €	0	0 €
Entsorgung heizwertreiche Fraktion	50	259.056	12.952.784 €	579.113	28.955.641 €
Entsorgung SBS	10	320.057	3.200.571 €	0	0 €
Entsorgung MBA	105	277.644	29.152.662 €	1.357.802	142.569.159 €
Entsorgung von Schadstoffen	50	700	34.978 €	700	34.978 €
Transport	10	2.133.638	21.336.379 €	2.133.638	21.336.379 €
Betriebskosten	6,6	2.133.638	14.082.010 €	2.133.638	14.082.010 €
Spezifische Kosten					
Eigene Berechnung			98 €*Mg ⁻¹		112 €*Mg ⁻¹
nach RETTENBERGER [2010b] incl. Transport			55 €*Mg ⁻¹		70 €*Mg ⁻¹
nach BÖLTE ET AL. [2011]			43 €*Mg ⁻¹		110 €*Mg ⁻¹
Gesamtkosten (2.133.638 Mg FM)					
Eigene Berechnung			209.978.092 €		238.982.735 €
nach RETTENBERGER [2010b] incl. Transport			117.350.082 €		149.354.650 €
nach BÖLTE ET AL. [2011]			91.746.428 €		234.700.165 €

* Im Rahmen der Entsorgung wird angenommen, dass ca. 196.000 Mg FM bzw. etwa 9 % der Gesamtmasse keiner weiteren Entsorgungsschiene zugeführt werden. Hierbei handelt es sich vorwiegend um sperrige Materialien (z.B. große Steine, Betonteile, Balken etc.), die bereits im Rahmen der Aufbereitung separiert und entsorgt/ verwertet werden.

Der Vergleich zu Kenndaten aus der Literatur macht deutlich, dass je nach Tiefe der Aufbereitung sowie potenzieller Verwertungspotenziale starke Kostenschwankungen auftreten können. Abbildung 146 verdeutlicht in diesem Kontext die Variationsbreite unterschiedlicher Kalkulationsansätze.

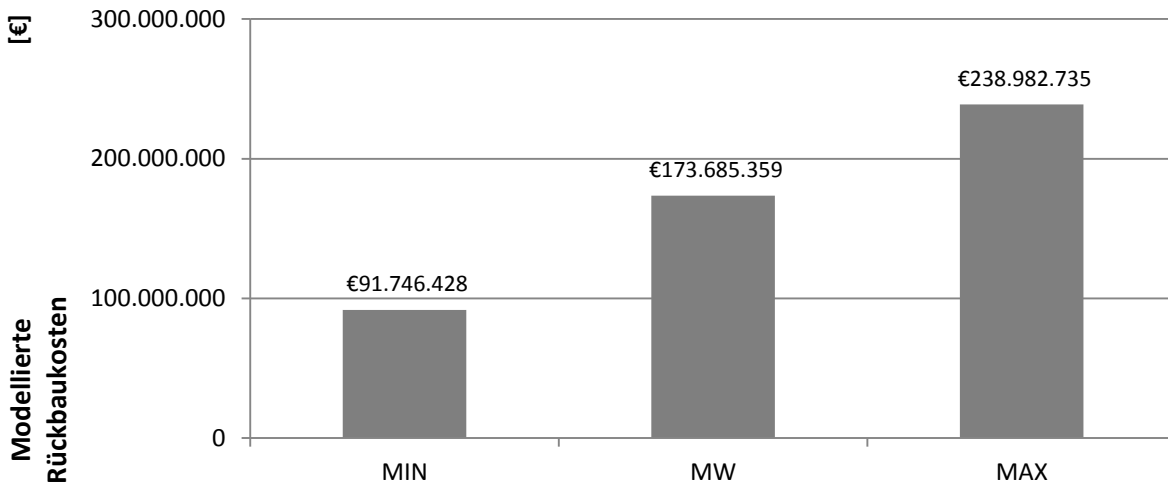


ABBILDUNG 146: MINIMALE, MITTLERE UND MAXIMALE RÜCKBAUKOSTEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG SPECIFISCHER KENNGRÖßEN (VERGL. TABELLE 37)

5.6 KOSTEN DER NACHSORGE

Die mittleren Kosten der Deponienachsorge der Kreismülldeponie Hechingen können unter Annahmen unterschiedlicher Autoren auf ca. 24 bis 43 Mio. € geschätzt werden. Hierbei wird von einer 50 Jahre andauernden Nachsorge ausgegangen (Abbildung 147). Einzelheiten der Kostenkalkulation sind Anhang 109 bis 113 zu entnehmen.

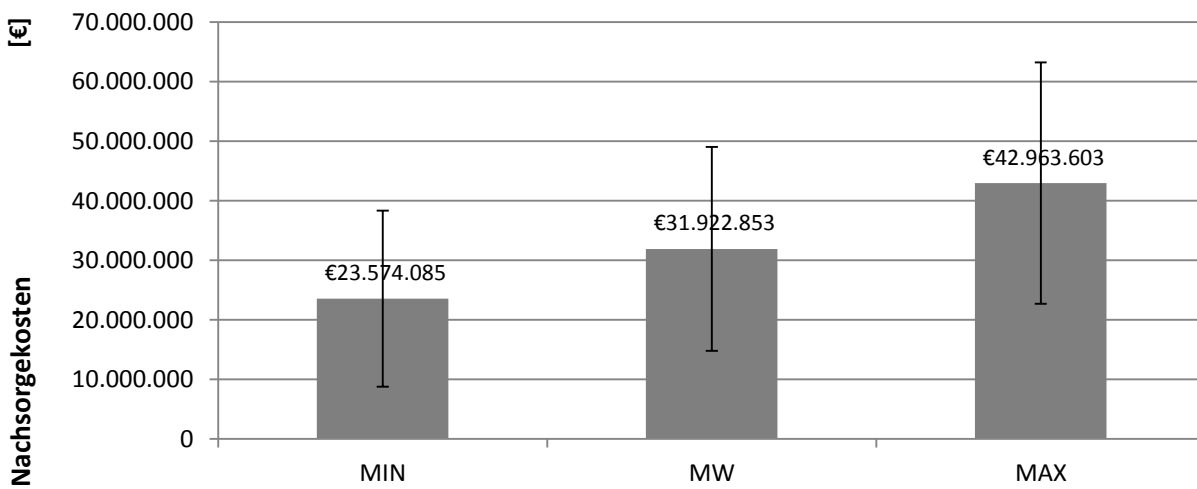


ABBILDUNG 147: MODELLIERTE NACHSORGEKOSTEN DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN (VERGL. ANHANG 113)

Ausgehend von diesen Gesamtnachsorgekosten kann unter Annahme eines linearen Kostenrückgangs innerhalb des Prognose-raums die in Abbildung 148 aufgeführte Folgekostenentwicklung abgeleitet werden.

Folgender Zusammenhang wird zugrunde gelegt:

FORMEL 23: KOSTENENTWICKLUNG DER NACHSORGEPHASE

$$Kosten_t = Kosten_{2012} * \left(1 - \frac{(t - 2012)}{Z}\right)$$

Mit:

Kosten_t: Nachsorgekosten zum Zeitpunkt t [€]
Kosten₂₀₁₂: Aktuelle Nachsorgekosten (vergl. Abbildung 147)
Z: Betrachtungszeitraum (50 Jahre)
t: Betrachtungszeitpunkt [Jahre]

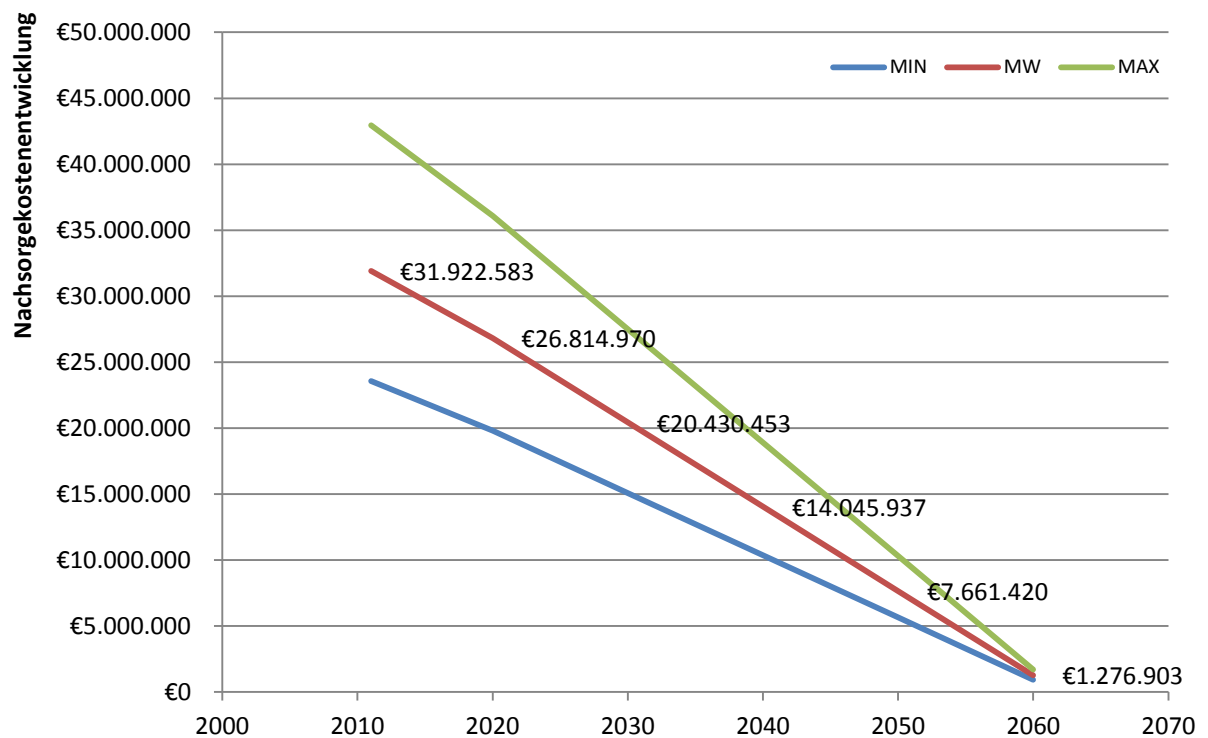


ABBILDUNG 148: NACHSORGEKOSTEN DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG EINER 50 JAHRE ANDAUERNDEN NACHSORGEPHASE

5.7 GANZHEITLICHE BEWERTUNG

Die Bewertung der Effizienz des Rückbaus der Kreismülldeponie Hechingen ergibt sich aus folgenden Faktoren:

- Anfallende Rückbau- und Aufbereitungskosten
- Erlöse der Rohstoffvermarktung
- Entfallende Nachsorge- und Folgekosten
- CO₂-Einsparpotenzial

5.7.1 RÜCKBAU ODER NACHSORGE – AKTUELL

Einen Eindruck zur Fragestellung „Rückbau oder Nachsorge unter aktuellen Rahmenbedingungen?“ gibt Tabelle 38. Es wird deutlich, dass unter idealen Annahmen ein Erlös des Rückbaus in Höhe von ca. 17,5 Mio. € erwirtschaftet werden könnte. Dies setzt allerdings voraus, dass minimale Rückbaukosten bei gleichzeitig maximalen Erlösen auftreten würden. Wahrscheinlicher erscheint in diesem Zusammenhang die Betrachtung des mittleren Szenarios. Hierbei ist mit einem Defizit von 87,8 Mio. € zu rechnen. Im Extremfall, also unter Annahme maximaler Rückbaukosten und minimaler Erlöse kann sich dieses Defizit sogar bis auf 173,9 Mio. € steigern.

Auf Basis dieser Ergebnisse ist festzuhalten, dass der Rückbau der Kreismülldeponie Hechingen unter aktuellen Rahmenbedingungen voraussichtlich unwirtschaftlich wäre.

Wie jedoch auch gezeigt wird, können bereits kleine Änderungen an den spezifischen Kosten- und Erlösfunktionen große Auswirkungen auf die Gesamtkalkulation haben. Neben der Preisentwicklung sekundärer Rohstoffe (in dieser Betrachtung ausschließlich Metalle betrachtet) ist vor allem die zukünftige Entwicklung auf dem Energiemarkt ein entscheidender Faktor für die Wirtschaftlichkeit des Deponierückbaus. Zusätzlich sollten weitere Kalkulationen und Untersuchungen im Bereich der Rückbaukosten ein klareres Bild schaffen. Praxisnahe Angaben zum technischen Einsatz der Deponiegutaufbereitung sowie daraus resultierende Kosten existieren derzeit nur bedingt, worin dringender Forschungsbedarf zu sehen ist.

TABELLE 38: BILANZIERUNG DER AUFGESTELLTEN KOSTEN UND ERLÖSE DES RÜCKBAUS DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN FÜR DAS JAHR 2011

Rahmendaten			
Aktuelle Betrachtung 2011	MIN	MW	MAX
Kosten des Deponierückbaus	-91.746.428 €	-173.685.359 €	-238.982.735 €
Erlöse der Rohstoffvermarktung (nur Metalle)	34.839.318 €	43.857.708 €	53.954.566 €
Entfallende Nachsorge- und Folgekosten	23.574.085 €	31.922.583 €	42.963.603 €
CO ₂ -Einsparpotenzial	6.690.786 €	10.076.172 €	12.326.730 €
Summe der Erlöse	65.104.189 €	85.856.462 €	109.244.899 €
Bilanz	-26.642.239 €	-87.828.897 €	-129.737.836 €

	MIN	MAX
Spannweite	17.498.471 €	-173.878.546 €

5.7.2 RÜCKBAU ODER NACHSORGE – ZUKÜNFTIG

Ausgehend von den aufgezeigten prognostizierten Preissteigerungen auf den Sekundärrohstoffmärkten, gleichbleibenden Rückbaukosten und einer Minderung der Nachsorge- sowie Folgekosten ergeben sich die in Tabelle 39 bis Tabelle 43 dargestellten Bilanzierungsmodelle. Preisänderungen für sekundäre Brennstoffe aus Abfall werden in diesem Kontext nicht betrachtet.

TABELLE 39: BILANZIERUNG DER AUFGESTELLTEN KOSTEN UND ERLÖSE DES RÜCKBAUS DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN FÜR DAS JAHR 2020

Rahmendaten			
Zukünftige Betrachtung 2020	MIIN	MW	MAX
Kosten des Deponierückbaus	-91.746.428 €	-173.685.359 €	-238.982.735 €
Erlöse der Rohstoffvermarktung (nur Metalle)	55.908.381 €	70.826.122 €	87.582.591 €
Entfallende Nachsorge- und Folgekosten	19.802.231 €	26.814.970 €	36.089.427 €
CO ₂ -Einsparpotenzial	6.690.786 €	10.076.172 €	12.326.730 €
Summe der Erlöse	82.401.398 €	107.717.263 €	135.998.748 €
Bilanz	-9.345.030 €	-65.968.096 €	-102.983.987 €
Spannweite			
	MIIN		MAX
	44.252.320 €		-156.581.337 €

TABELLE 40: BILANZIERUNG DER AUFGESTELLTEN KOSTEN UND ERLÖSE DES RÜCKBAUS DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN FÜR DAS JAHR 2030

Rahmendaten			
Zukünftige Betrachtung 2030	MIIN	MW	MAX
Kosten des Deponierückbaus	-91.746.428 €	-173.685.359 €	-238.982.735 €
Erlöse der Rohstoffvermarktung (nur Metalle)	79.752.738 €	101.346.915 €	125.640.224 €
Entfallende Nachsorge- und Folgekosten	15.087.414 €	20.430.453 €	27.496.706 €
CO ₂ -Einsparpotenzial	6.690.786 €	10.076.172 €	12.326.730 €
Summe der Erlöse	101.530.938 €	131.853.539 €	165.463.660 €
Bilanz	9.784.510 €	-41.831.819 €	-73.519.075 €
Spannweite			
	MIIN		MAX
	73.717.232 €		-137.451.797 €

TABELLE 41: BILANZIERUNG DER AUFGESTELLTEN KOSTEN UND ERLÖSE DES RÜCKBAUS DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN FÜR DAS JAHR 2040

Rahmendaten			
Zukünftige Betrachtung 2040	MIIN	MW	MAX
Kosten des Deponierückbaus	-91.746.428 €	-173.685.359 €	-238.982.735 €
Erlöse der Rohstoffvermarktung (nur Metalle)	103.601.448 €	131.873.279 €	163.704.804 €
Entfallende Nachsorge- und Folgekosten	10.372.597 €	14.045.937 €	18.903.985 €
CO ₂ -Einsparpotenzial	6.690.786 €	10.076.172 €	12.326.730 €
Summe der Erlöse	120.664.831 €	155.995.387 €	194.935.519 €
Bilanz	28.918.403 €	-17.689.971 €	-44.047.216 €
Spannweite			
	MIIN		MAX
	103.189.091 €		-118.317.904 €

TABELLE 42: BILANZIERUNG DER AUFGESTELLTEN KOSTEN UND ERLÖSE DES RÜCKBAUS DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN FÜR DAS JAHR 2050

Rahmendaten			
Zukünftige Betrachtung 2050	MIIN	MW	MAX
Kosten des Deponierückbaus	-91.746.428 €	-173.685.359 €	-238.982.735 €
Erlöse der Rohstoffvermarktung (nur Metalle)	127.445.805 €	162.394.072 €	201.762.436 €
Entfallende Nachsorge- und Folgekosten	5.657.780 €	7.661.420 €	10.311.265 €
CO ₂ -Einsparpotenzial	6.690.786 €	10.076.172 €	12.326.730 €
Summe der Erlöse	139.794.371 €	180.131.664 €	224.400.431 €
Bilanz	48.047.943 €	6.446.305 €	-14.582.304 €
Spannweite			
	MIIN		MAX
	132.654.003 €		-99.188.364 €

TABELLE 43: BILANZIERUNG DER AUFGESTELLTEN KOSTEN UND ERLÖSE DES RÜCKBAUS DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN FÜR DAS JAHR 2060

Rahmendaten			
Zukünftige Betrachtung 2060	MIN	MW	MAX
Kosten des Deponierückbaus	-91.746.428 €	-173.685.359 €	-238.982.735 €
Erlöse der Rohstoffvermarktung (nur Metalle)	151.294.515 €	192.920.437 €	239.827.016 €
Entfallende Nachsorge- und Folgekosten	942.963 €	1.276.903 €	1.718.544 €
CO ₂ -Einsparpotenzial	6.690.786 €	10.076.172 €	12.326.730 €
Summe der Erlöse	158.928.264 €	204.273.512 €	253.872.291 €
Bilanz	67.181.836 €	30.588.153 €	14.889.556 €

	MIN	MAX
Spannweite	162.125.863 €	-80.054.471 €

Bereits im Jahr 2020 können unter den definierten Bedingungen maximale Gewinne von 44,3 Mio. € erzielt werden. Das Risiko durch den Rückbau zusätzliche Kosten zu verursachen, bleibt jedoch weiterhin hoch, was durch die mittlere und maximale Betrachtung zum Ausdruck kommt. Hierbei würden auf Kostenseite 66,0 bis 103,0 Mio. € anfallen.

Durch weitere Preissteigerung im Sekundärrohstoffsektor verbessert sich die Situation in Hinblick auf einen Rückbau der Kreismülldeponie Hechingen. Dennoch bleibt zu beachten, dass die mittleren Annahmen weiterhin ein deutliches Minus aufzeigen.

Grundsätzlich ändert sich an dieser Betrachtung auch im Jahr 2040 nichts. Allerdings verlagert sich die Spannweite des Modells zu Gunsten potenzieller Erlöse. Diese kann mit 103,2 bis 118,3 Mio. € angegeben werden. Über einen Deponierückbau sollte an dieser Stelle nachgedacht werden, da sich mögliche Kosten und Erlöse die Waage halten.

In der Prognose für das Jahr 2050 nimmt erstmals die mittlere Betrachtung einen positiven Wert an. Demnach resultieren aus einem ganzheitlichen Rückbau der Kreismülldeponie Hechingen rund 6,4 Mio. €. Das Verhältnis von maximalen Gewinnen und Verlusten verschiebt sich dabei immer weiter in Richtung der Erlössituation.

Im Modell des Jahres 2060 zeigen sich für die betrachteten Szenarien MIN, MW und MAX jeweils positive Bilanzen. Dies bedeutet, dass unter den angenommenen Randbedingungen durch den Rückbau des Deponiekörpers Erlöse erzielt werden können. Die Höhe dieser ist mit 67,2 bis 14,9 Mio. € anzusetzen. Dennoch besteht auch zu diesem Zeitpunkt ein Restrisiko Verluste zu erwirtschaften. Dieses tritt auf, wenn maximale Kosten entstehen und minimale Erlöse zu erwarten sind. Das Defizit kann an dieser Stelle immer noch bis zu 80,1 Mio. € betragen.

Zur Abschätzung des Zeitpunkts, zu dem sich Kosten und Erlöse die Waage halten, kann Abbildung 149 herangezogen werden. Diese verdeutlicht, dass unter idealen Rückbaubedingungen (optimistisches Modell) bereits heute ein gewinnbringender Rückbau der Kreismülldeponie Hechingen durchführbar wäre.

Gegenteiliges beschreibt jedoch die enthaltene pessimistische Abschätzung, die zum Ergebnis hat, dass selbst nach dem Jahr 2060 die Deponienachsorge die bessere Alternative darstellt.

Die übrigen Modelle ordnen sich zwischen diesen beiden Extremen an. Nach ihnen ergibt sich für die Jahre 2025, 2048 und 2055 ein Gleichgewicht der Kosten und Erlöse des Deponierückbaus.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass unter günstigen Randbedingungen bereits heutzutage der Rückbau von Deponien eine sinnvolle Alternative zur Deponienachsorge darstellt. Dies betrifft nicht nur die gegenübergestellten Kosten. Positive Nebeneffekte treten ebenfalls durch die Entlastung der Umwelt auf, die bspw. in Form von entfallenden CO₂-Emissionen bewertet werden können. Hierneben stellt der Flächengewinn, je nach Lage und Umfeld des Deponiekörpers, einen positiv zu

bewerteten Effekt dar, der jedoch im Fall der Kreismülldeponie Hechingen nur geringe Relevanz besitzt und daher nicht in die Betrachtung aufgenommen wurde.

Die Ergebnisse belegen auch, dass der Rückbau von Deponien in naher Zukunft deutlich an Bedeutung gewinnt und praktikabel wird. Aufgewiesene Zeiträume von 20 bis 30 Jahren können in diesem Zusammenhang als realistische Planungsgröße angesehen werden und müssen genutzt werden, um weitere Erfahrungen auf diesem Gebiet zu erlangen.

Nur in ungünstigsten Fällen kann die heute gängige Deponienachsorge als bessere Alternative genannt werden, wobei ausdrücklich festzuhalten gilt, dass derzeit keine realitätsnahen Angaben zur Zeitdauer dieser Phase sowie zur Beständigkeit notwendiger technischer Einrichtungen bestehen. Die Unbestimmtheit dieser beiden Faktoren kann im Umkehrschluss zu deutlichen Steigerungen der benötigten Nachsorgeaufwendungen führen.

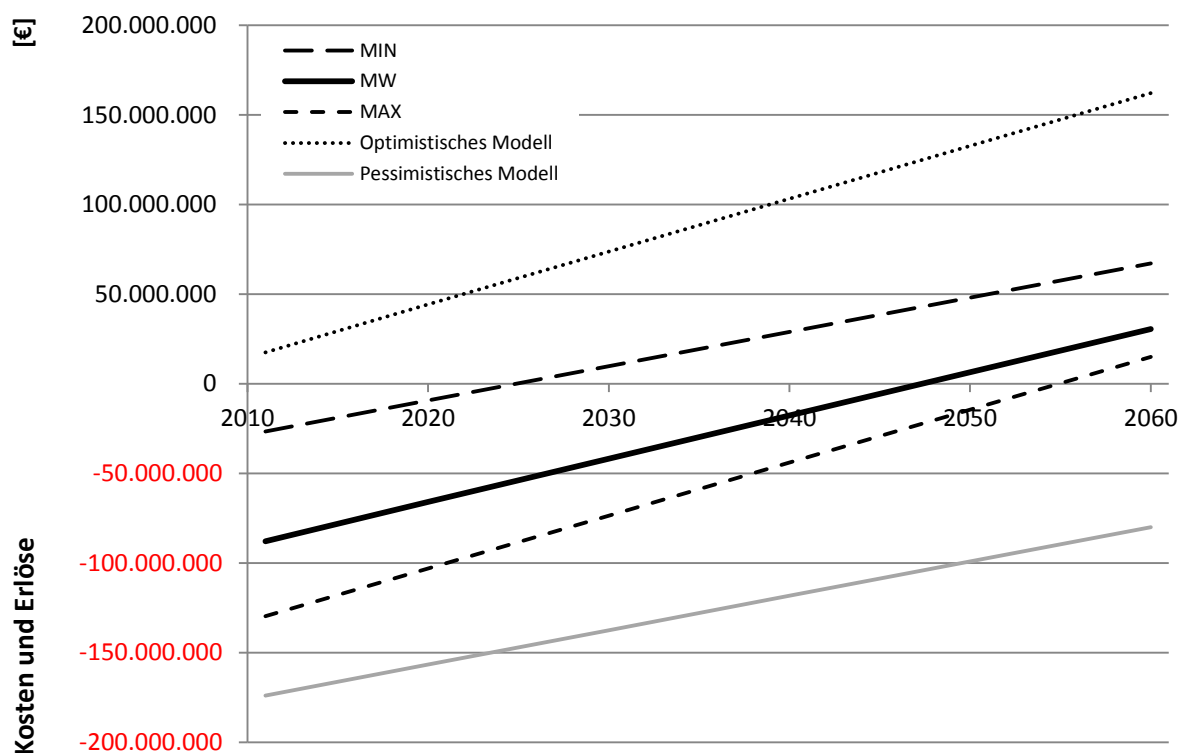


ABBILDUNG 149: KOSTEN UND ERLÖSE DES RÜCKBAUS DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN IN ABHÄNGIGKEIT DES RÜCKBAUZEITPUNKTS

5.7.3 TECHNISCHER FORTSCHRITT BEI DER DEPONIEGUTAUFBEREITUNG

Die bisherigen Betrachtungen sind davon ausgegangen, dass zukünftig keine Effizienzsteigerungen und somit Kosteneinsparungen bei der Deponiegutaufbereitung stattfinden. Wie sich jedoch in den letzten Jahren in der Recyclingbranche gezeigt hat, ist diese Annahme nicht realitätsnah.

Bedingt durch steigende Energiepreise und fortschreitende Automatisierung der Aufbereitungs- und Sortiertechnik gewann und wird das Thema der Effizienzsteigerung im Aufbereitungsprozess weiter an Bedeutung gewinnen. In diesem Zusammenhang gelang es bereits zahlreichen Recyclingbetrieben ihre Energie- und Aufbereitungseffizienz deutlich zu steigern und den gestiegenen Kosten entgegenzuwirken [ENERGIEAGENTUR.NRW, 2010].

Die großtechnische Aufbereitung rückgebauter Abfälle stellt die Recyclingbranche vor neue Herausforderungen und Probleme, die es zu lösen gilt. Entsprechend hoch kann daher die Möglichkeit zur Effizienzsteigerung und somit zur Kosteneinsparung eingestuft werden.

Ausgehend vom Status quo wird im Rahmen dieser Arbeit angenommen, dass eine 10- bis 30-prozentige Kosteneinsparung durch Effizienzsteigerung im Aufbereitungsprozess von Deponiegut und technischen Fortschritt erzielt werden kann. Zudem wird berücksichtigt, dass zu Beginn der technischen Weiterentwicklung – in dieser Betrachtung auf das Jahr 2011 festgelegt - deutlich höhere Effizienzsteigerungen und somit Kostenreduzierungen realisierbar sind. Abbildung 150 verdeutlicht diese Annahmen.

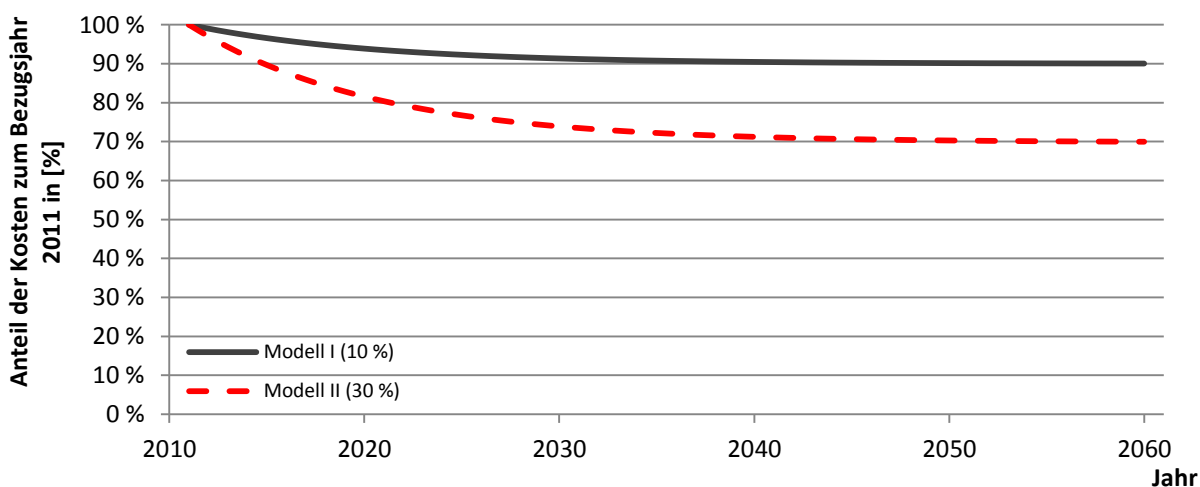


ABBILDUNG 150: KOSTENREDUKTION DER AUFBEREITUNG VON DEPONIEGUT DURCH STEIGERUNG DER AUFBEREITUNGSEFFIZIENZ UND DES TECHNISCHEN FORTSCHRITTS (BEZUGSBASIS: MODELLIERTEN AUFBEREITUNGSKOSTEN DES JAHRES 2011)

Unter Berücksichtigung dieser Annahme gestalten sich die Kosten- und Nutzenfunktionen des Deponierückbaus der Kreismülldeponie Hechingen wie in Abbildung 151 und 152 dargestellt. Bei Betrachtung beider Abbildungen wird ersichtlich, dass Effizienzsteigerung der Aufbereitung und technischer Fortschritt die Möglichkeit des Deponierückbaus deutlich steigern kann und dieser bereits weitaus früher nutzeneffizient sowie wirtschaftlich realisierbar wäre.

Unter Annahme einer 10-prozentigen Kosteneinsparung in den kommenden 20 Jahren (Modell I) wäre in Abhängigkeit der betrachteten Szenarien ein kostenneutraler Rückbau der Kreismülldeponie Hechingen in den Jahren 2021 (MIN), 2041 (MW) und 2048 (MAX) denkbar.

Die optimistische Abschätzung beschreibt wie bereits zuvor eine grundsätzlich gegebene und gewinnbringende Rückbaufähigkeit der Kreismülldeponie Hechingen. Das definierte pessimistische Szenario beschreibt hingegen ein gegenteiliges Bild. Demnach wäre selbst im Jahr 2060 mit Rückbaukosten in Höhe von ca. 60 Mio. € zu rechnen.

Selbst bei weiteren Effizienzsteigerungen, die sich in Gesamtkosteneinsparungen der Aufbereitung von 30 % widerspiegeln, bleibt die Kurve des pessimistischen Szenarios bis zum betrachteten Jahr 2060 unterhalb der Erlössituation. Unter den getroffenen Annahmen würde der Rückbau der Kreismülldeponie Hechingen zu diesem Zeitpunkt Kosten in Höhe von ca. 20 Mio. € verursachen. Bei Betrachtung der übrigen Szenarien rückt der Deponierückbau jedoch in greifbare Nähe, sodass ab den Jahren 2018 (MIN), 2030 (MW) und 2035 (MAX) mit einem kostenneutralen Rückbau der Kreismülldeponie Hechingen zu rechnen ist.

Für das Jahr 2060 zeichnet sich in diesem Zusammenhang für die Szenarien MIN, MW und MAX eine Erlössituation von ca. 40 – 80 Mio. € ab.

Abschließend ist festzuhalten, dass Effizienzsteigerungen der Aufbereitungen und technischer Fortschritt zu einer Senkung der Aufbereitungskosten führen. Hieraus ergibt sich, dass der nutzeneffiziente Rückbau einer Deponie deutlich früher realisiert werden kann, als zuvor angenommen.

Im Mittel (Szenario MW) zeigt sich für die Kreismülldeponie Hechingen, dass ein 10-prozentiger Rückgang der Aufbereitungskosten, den kostenneutralen Rückbau um ca. 10 Jahre nach vorne verschiebt. Unter Annahme einer 30-prozentigen Kostenminderung gestaltet sich der Deponierückbau im Vergleich zur Deponienachsorge bereits 20 Jahre früher als im Ausgangsszenario definiert als bessere Alternative aus.

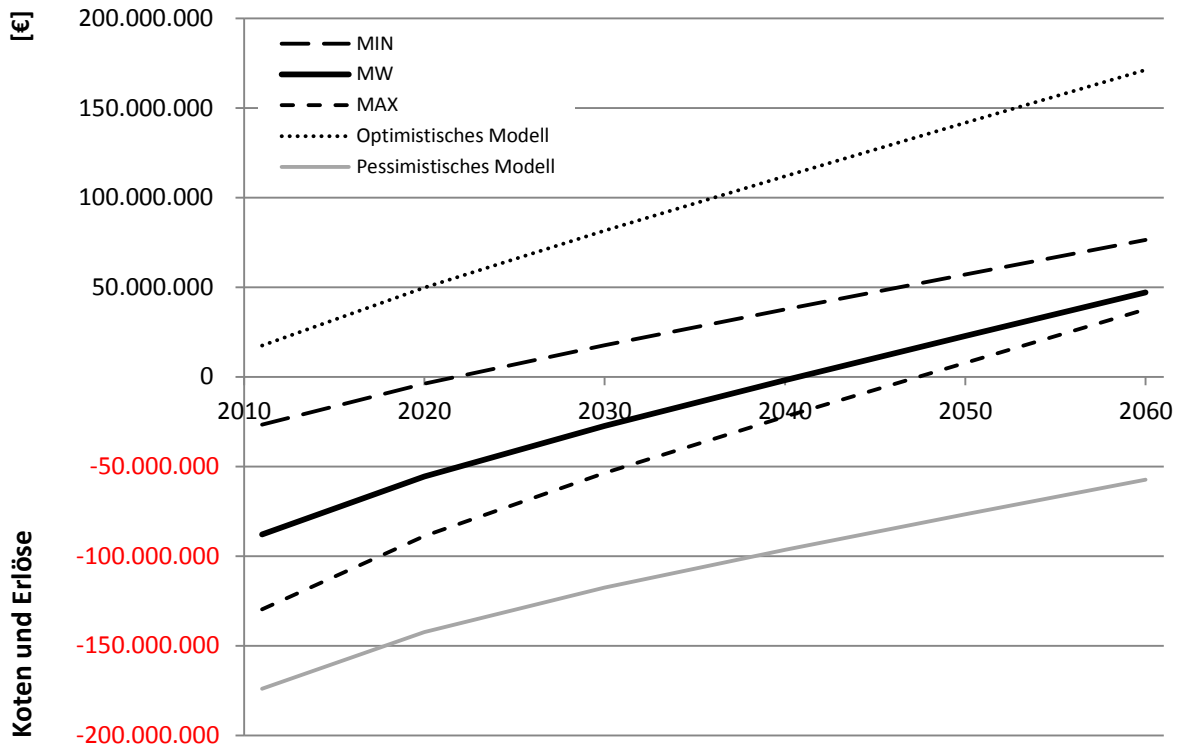


ABBILDUNG 151: KOSTEN UND ERLÖSE DES RÜCKBAUS DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN IN ABHÄNGIGKEIT DES RÜCKBAUZEITPUNKTS BEI EINER 10-PROZENTIGEN KOSTENEINSPARUNG DER DEPONIEGUTAUFBEREITUNG DURCH EFFIZIENZSTEIGERUNG UND TECHNISCHEN FORTSCHRITT

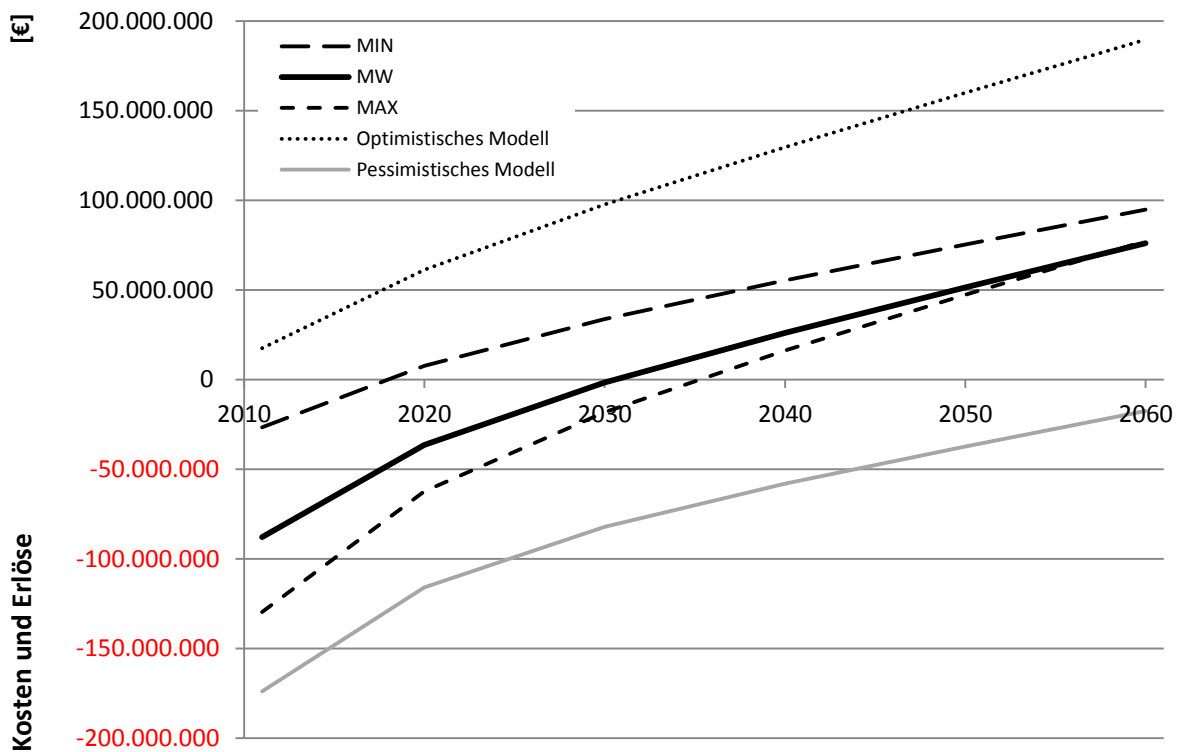


ABBILDUNG 152: KOSTEN UND ERLÖSE DES RÜCKBAUS DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN IN ABHÄNGIGKEIT DES RÜCKBAUZEITPUNKTS BEI EINER 30-PROZENTIGEN KOSTENEINSPARUNG DER DEPONIEGUTAUFBEREITUNG DURCH EFFIZIENZSTEIGERUNG UND TECHNISCHEN FORTSCHRITT

5.7.4 ENERGIEPREISENTWICKLUNG

„Vor dem Hintergrund abfall- und klimapolitischer Zielvorgaben auf nationaler und europäischer Ebene hat der Einsatz von Ersatzbrennstoffen in den letzten Jahren an großer Bedeutung gewonnen. Mit der Umsetzung der technischen Anleitung für Siedlungsabfälle zum 1. Juni 2005 wurden vor allem wirtschaftliche Anreize für die weitere und intensivere Nutzung von Ersatzbrennstoffen geschaffen“ [BONNET & VIERTTEL, 2007].

Wie aufgezeigt, spielt die Preisentwicklung auf den weltweiten und lokalen Primär- und Sekundärenergiemärkten eine entscheidende Rolle für die Beurteilung des nutzeneffizienten und wirtschaftlichen Rückbaus einer Deponie. Ausgehend von der starken Nachfrage nach Energie kann vermutet werden, dass zukünftig heizwertreiche Abfallstoffe gewinnbringend vermarktet werden können.

Untersuchungen von ALWAST & BIRNSTENGEL [2010] zeigen, dass die Preise für die Verwertung von Ersatzbrennstoffen regional stark schwanken. Zudem wird aufgezeigt, dass in Deutschland zukünftig mit starken Überkapazitäten für die thermische Behandlung (MVA) und die energetische Verwertung (EBS-Kraftwerke) von Abfällen zu rechnen ist. Diese werden in einer Größenordnung von ca. 10 bis 20 % der im Jahr 2020 bestehenden Anlagenkapazität beziffert.

Die Ursache hierfür kann einerseits im Aus- und Aufbau weiterer Behandlungs- sowie Verwertungsanlagen gesehen werden. Andererseits wird ein weiterer Rückgang des spezifischen Abfallaufkommens prognostiziert, der mittel- bis langfristig für eine thermische Behandlung oder energetische Verwertung entfällt.

Für die Betreiber von MVA- und EBS-Kraftwerken bedeutet dies auch aufgrund der Tatsache, dass beide Teilmärkte hohe Wechselwirkungen aufzeigen, einen verstärkten Preiswettbewerb um Abfälle und daraus resultierende sekundäre Energierohstoffe [ALWAST & BIRNSTENGEL, 2010; TREND:RESEARCH, 2009].

Unter Berücksichtigung zukünftig stark steigender Energiepreise für fossile Primärenergieträger (wie bspw. Öl, Gas und Kohle) werden von Seiten energieintensiver Industriebranchen große Chancen für die energetische Nutzung von Abfällen bzw. der daraus resultierenden Ersatzbrennstoffe gesehen [ALWAST & BIRNSTENGEL, 2010].

Entsprechend ist davon auszugehen, dass derzeit zuzahlungspflichtige Ersatzbrennstoffe zukünftig einen wirtschaftlichen Wert darstellen. Gleichzeitig werden aufgrund von Marktabhängigkeiten die Zuzahlungen zur thermischen Beseitigung weiter fallen.

Insgesamt lässt sich dieser komplexe Energiemarkt derzeit aufgrund regionaler Unterschiede, bestehender Abnehmerverträge und starker Wechselwirkungen zum Primärenergiemarkt nur schwer abgrenzen. In diesem Zusammenhang werden für die Abgrenzung des nutzeneffizienten Rückbaus der Kreismülldeponie Hechingen die in Abbildung 153 enthaltenen Preisentwicklungen auf dem EBS-Rohstoffmarkt angenommen. Eine Minderung der Kosten der thermischen Behandlung für im Rahmen des Deponierückbaus anfallende Stoffgruppen wird in diesem Kontext nicht berücksichtigt, wobei auch hier Kostenreduzierungen durch Überkapazitätenausgleich zu vermuten sind.

Die Annahme, dass die Preise für EBS im Jahr 2020 bei ca. 10 €*Mg⁻¹ liegen werden (Modell I), sorgt für einen deutlichen Anstieg der in Abbildung 154 aufgezeigten Kosten-/Nutzenfunktionen in dieser Periode. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass im Ausgangsszenario Zuzahlungen für EBS in Höhe von 50 €*Mg⁻¹ angesetzt wurden, sodass die tatsächliche Preisdifferenz und somit auch Kosteneinsparung mit 60 €*Mg⁻¹ zu beziffern ist.

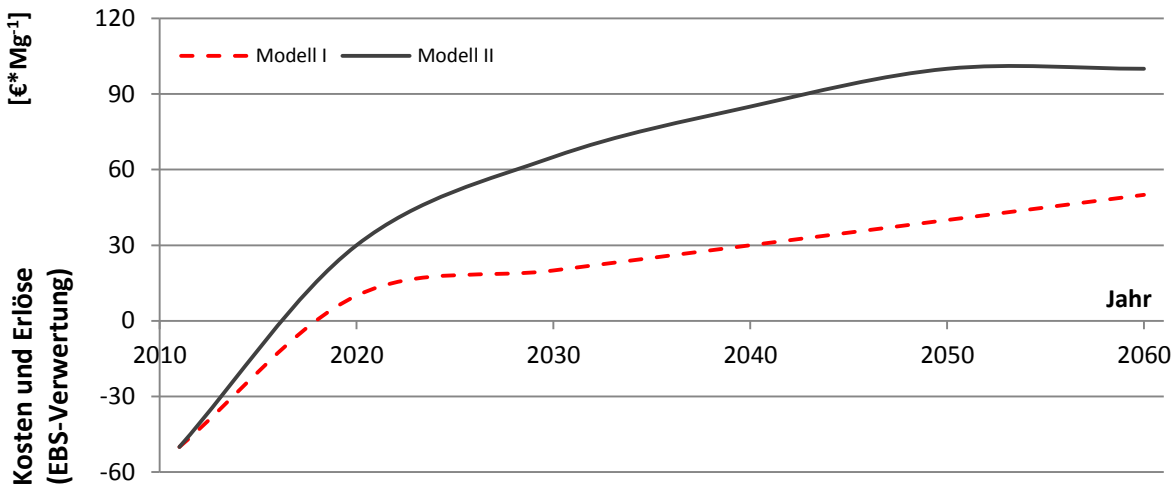


ABBILDUNG 153: IM RAHMEN DER FOLGEMODELLIERUNG ANGENOMMENE PREISENTWICKLUNGEN AUF DEM EBS-ROHSTOFFMARKT VON 2011 BIS 2060

Aufgrund des in den Folgejahren definierten schwächeren EBS-Preisanstiegs ($1 \text{ €} \cdot \text{Mg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) flachen die in Abbildung 154 aufgezeigten Funktionen nach dem Jahr 2020 deutlich ab. Unter den definierten Randbedingungen ergibt sich selbst im schlechtesten Fall (Pessimistisches Modell) die nutzeneffiziente Rückbaufähigkeit der Kreismülldeponie Hechingen im betrachteten Zeitraum bzw. im Jahr 2050. Für die übrigen Szenarien ergibt sich ein kostenneutraler Rückbau der Kreismülldeponie Hechingen in den Jahren 2016 (MIN), 2024 (MW) und 2028 (MAX). Der optimistische Ansatz beschreibt zudem, dass bereits aktuell ein wirtschaftlicher Rückbau denkbar wäre.

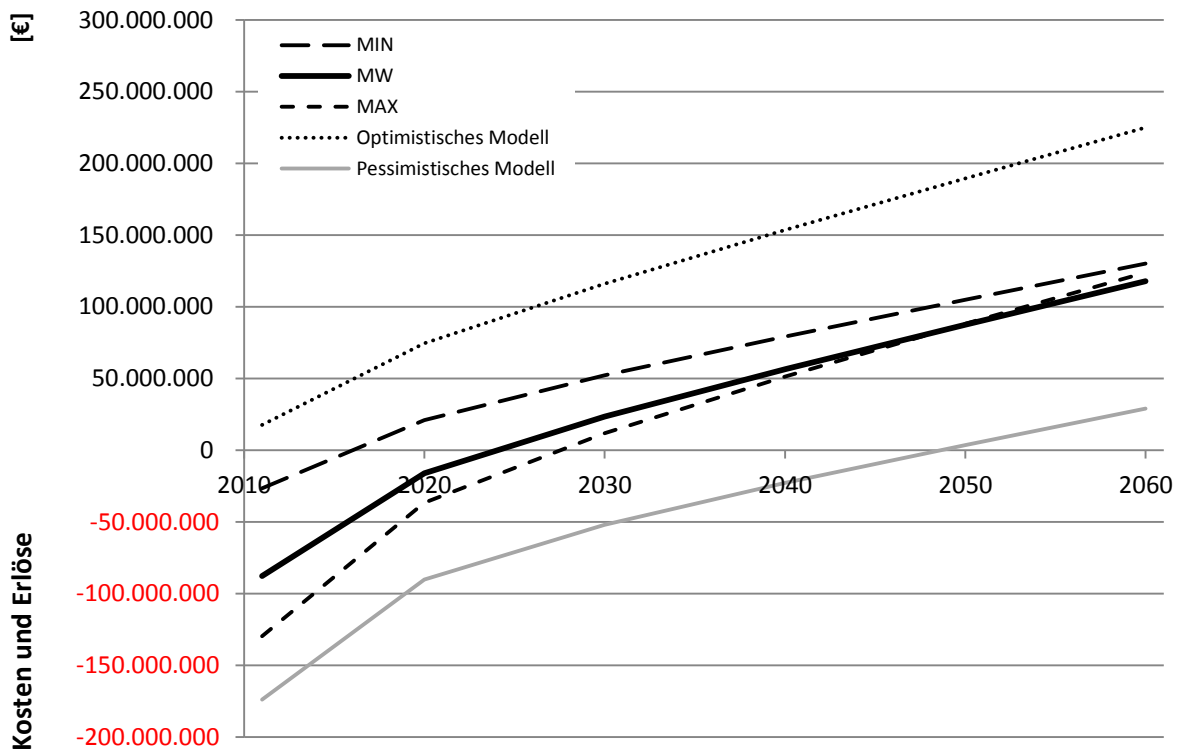


ABBILDUNG 154: KOSTEN UND ERLÖSE DES RÜCKBAUS DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN IN ABHÄNGIGKEIT DES RÜCKBAUZEITPUNKTS BEI EINER 30-PROZENTIGEN KOSTENEINSPARUNG DER DEPONIEGUTAUFBEREITUNG DURCH EFFIZIENZSTEIGERUNG UND TECHNISCHEN FORTSCHRITT SOWIE DEN IN ABBILDUNG 153 AUFGEZEIGTEN PREISENTWICKLUNGEN AUF DEM EBS-ROHSTOFFMARKT (MODELL I)

Unter Berücksichtigung deutlich stärkerer EBS-Preisentwicklungen (Modell II) ergeben sich die in Abbildung 155 aufgezeigten Verschiebungen der Kosten-/Nutzenfunktionen des Rückbaus der Kreismülldeponie Hechingen.

Wie zu erwarten ist, verschieben sich die Kurven weiter nach links, sodass bereits früher an einen kostenneutralen Deponierückbau zu denken ist bzw. dieser vorteilhafter als die Nachsorge wäre. Konkret können bei den hier getroffenen Annahmen die Jahre 2014 (MIN), 2021 (MW), 2023 (MAX) und 2038 (Pessimistisches Modell) als Wendepunkte angesehen werden, sodass der Rückbau der Kreismülldeponie Hechingen in den kommenden 10 bis 20 Jahren realistisch und vorteilhaft erscheint.

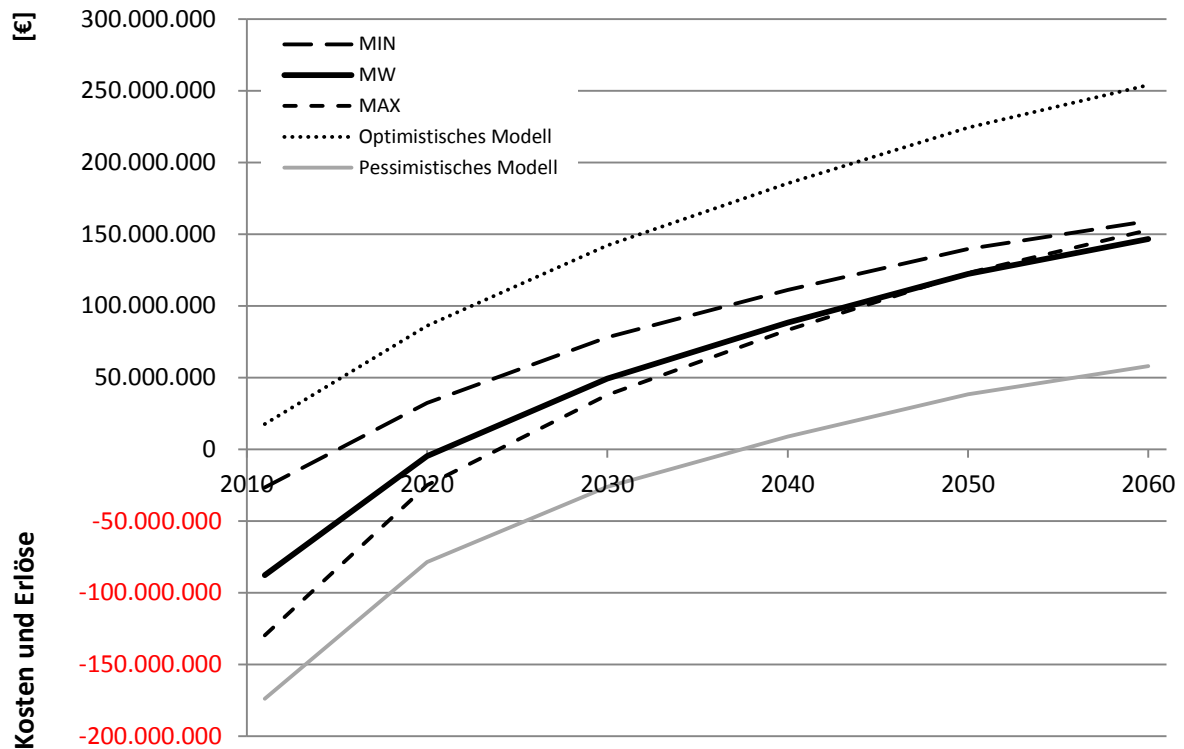


ABBILDUNG 155: KOSTEN UND ERLÖSE DES RÜCKBAUS DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN IN ABHÄNGIGKEIT DES RÜCKBAUZEITPUNKTS BEI EINER 30-PROZENTIGEN KOSTENEINSPARUNG DER DEPONIEGUTAUFBEREITUNG DURCH EFFIZIENZSTEIGERUNG UND TECHNISCHEN FORTSCHRITT SOWIE DEN IN ABBILDUNG 153 AUFGEZEIGTEN PREISENTWICKLUNGEN AUF DEM EBS-ROHSTOFFMARKT (MODELL II)

5.7.5 ZUSAMMENFASSENDE BETRACHTUNG

Abbildung 156 verdeutlicht die Auswirkungen geänderter Rahmenbedingungen auf die Kosten- und Erlössituation des Rückbaus der Kreismülldeponie Hechingen. Hierbei wird deutlich, dass technischer Fortschritt und Effizienzsteigerungen im Aufbereitungsprozess sowie Erlöse für die Vermarktung von Ersatzbrennstoffen den nutzeffizienten Rückbau deutlich früher realisierbar machen. Das dabei aufgezeigte Zeitfenster erstreckt sich von 2021 bis 2048.

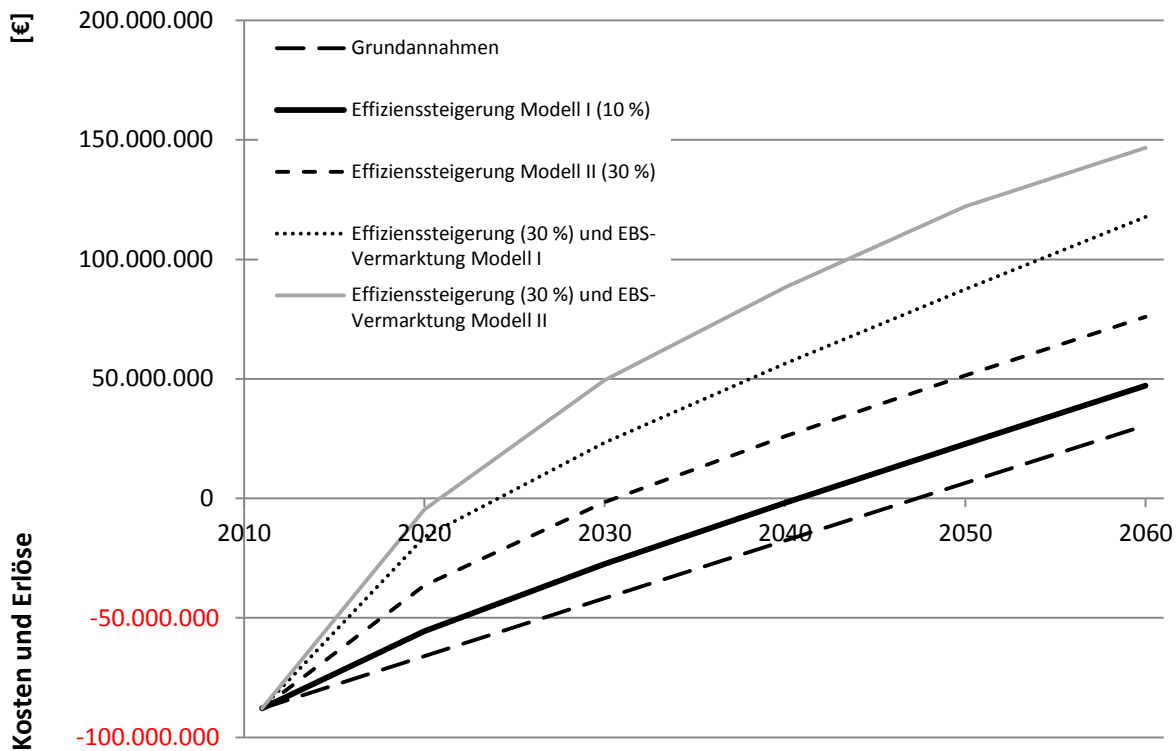


ABBILDUNG 156: AUSWIRKUNGEN VERÄNDERTER RAHMENBEDINGUNGEN (TECHNISCHE WEITERENTWICKLUNG UND ENERGIEPREISENTWICKLUNG) AUF DIE KOSTEN UND ERLÖSE DES RÜCKBAUS DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN (AUSGANGSSZENARIO ALLER BETRACHTUNGEN IST JEWEILS SZENARIO MW)

Insgesamt muss jedoch auch berücksichtigt werden, dass die hier dargestellten Kosten-/Nutzenfunktionen des Rückbaus der Kreismülldeponie nur unter den definierten Randbedingungen zutreffen. So können bspw. starke Preiseinfälle auf dem EBS-Markt oder höhere Kosten der thermischen Verwertung von Reststoffen ein gegenteiliges Bild bewirken.

Im Fall der Effizienzsteigerung des Aufbereitungsprozesses durch technischen Fortschritt und Anlagenoptimierung ist zu beachten, dass zu erwartende starke Preisanstiege von Energie die hierdurch mögliche Kostenminimierung senken können.

Mittel- und langfristig gilt es daher, die Entwicklungen auf den Rohstoff- und Energiemärkten sowie die Kostenpunkte der Deponiegutaufbereitung und Reststoffentsorgung weiterhin zu beobachten und angenommene Modellparameter entsprechend zu aktualisieren.

Diese Notwendigkeit ergibt sich aus der Tatsache, dass die hier aufgestellten realitätsbezogenen Modelle zur Kosten- und Nutzenstruktur des Rückbaus der Kreismülldeponie Hechingen einen Rückbau in den kommenden 10 bis 20 Jahren nutzeneffizient erscheinen lassen.

6 ABSCHLIEBENDE DISKUSSION UND FAZIT

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

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

Die Gegenüberstellung bekannter Literaturwerte zum theoretischen Ressourcenpotenzial der Kreismülldeponie Hechingen wird aus Abbildung 157 ersichtlich. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund unterschiedlicher Rahmenbedingungen der Modellierung kein direkter Vergleich möglich ist.

Dennoch zeigt sich, dass die Abschätzungen der Kreismülldeponie Hechingen bei allen gezeigten Stofffraktionen im Wertebereich der aufgeführten Untersuchungen liegen.

Für Kunststoffe und Glas liegt die Kreismülldeponie Hechingen ohne Berücksichtigung des Abbaus der organischen Substanz mit einem mittleren Wert von 7,2 Gew.-% der FM auf dem Niveau der Untersuchungen nach MOCKER ET AL. [2009A]. Unter Berücksichtigung des Abbaus der organischen Substanz bzw. beim Vergleich der Ergebnisse mit WIEMER ET AL. [2009]** zeigt sich, dass sich die Kreismülldeponie Hechingen im Vergleich zu den untersuchten hessischen Referenzdeponien durch einen um 1,2 Gew.-% höheren Kunststoffanteil auszeichnet. In diesem Zusammenhang schätzten WIEMER ET AL. [2009]* das Kunststoffpotenzial der Deponie Kirschenplantage mit ca. 10 Gew.-% der FM vergleichsweise hoch ein.

Für Glas zeigt sich beim Abgleich der einzelnen Ansätze ein ähnliches Bild. Hierbei ist festzuhalten, dass der Glasanteil der Kreismülldeponie dem nach MOCKER ET AL. [2009A] berechneten bundesdeutschen Durchschnitt entspricht. Auf Hessen bezogen, liegt der Glasanteil der Kreismülldeponie Hechingen mit ca. 4,4 Gew.-% der FM etwa doppelt so hoch. Die Untersuchungen der Deponie Kirschenplantage beschreiben erneut ein insgesamt hoch einzustufendes Potenzial an Glas.

Aufgrund der Tatsache, dass die Potenzialermittlungen nach WIEMER ET AL. [2009] keine Trennung in Fe- und NE-Metalle vornehmen, müssen diese beiden Stofffraktionen an dieser Stelle gemeinsam betrachtet werden. Hierbei zeigt sich, dass die Kreismülldeponie Hechingen mit einem Gesamtmetallgehalt von ca. 3 Gew.-% der FM genau zwischen dem hessenweiten Mittel (4 Gew.-% FM) und der Deponie Kirchenplantage (2 Gew.-% FM) einzuordnen ist.

Beim Vergleich mit MOCKER ET AL. [2009A] und RETTENBERGER [2009] wird deutlich, dass die theoretische Potenzialermittlung der Kreismülldeponie Hechingen den bundesdeutsch vermuteten Fe-Metallgehalt um ca. 1 Gew.-% der FM unterschreitet. Der Anteil an NE-Metallen im Deponiekörper der Kreismülldeponie Hechingen liegt mit ca. 0,6 Gew.-% der FM hingegen im oberen Bereich.

Für Mineralstoffe ordnet sich die Kreismülldeponie Hechingen den nach MOCKER ET AL. [2009A] ermittelten Werten ein. WIEMER ET AL. [2009] schreiben dieser Stofffraktion einen wesentlich höheren Stellenwert zu.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass sich die Anteile der aufgeführten Stofffraktion der Kreismülldeponie Hechingen den nach MOCKER ET AL. [2009A] und RETTENBERGER [2009] berechneten bundesdeutschen Durchschnittswerten einordnen lassen. In Bezug auf Hessen [WIEMER ET AL., 2009]** weist die Kreismülldeponie Hechingen zum Teil ein deutlich höheres Potenzial der aufgezeigten Stofffraktionen auf. Das theoretische Rohstoffpotenzial der Deponie Kirschenplantage wird von WIEMER ET AL. [2009]* hingegen sowohl in Bezug auf MOCKER ET AL. [2009A] und RETTENBERGER [2009] als auch auf die Ergebnisse der Kreismülldeponie Hechingen vergleichsweise hoch eingeschätzt. Die Ursachen für die starke Abweichung zum bestimmten mittleren hessischen Rohstoffpotenzial werden von WIEMER ET AL. [2009] jedoch nicht genannt.

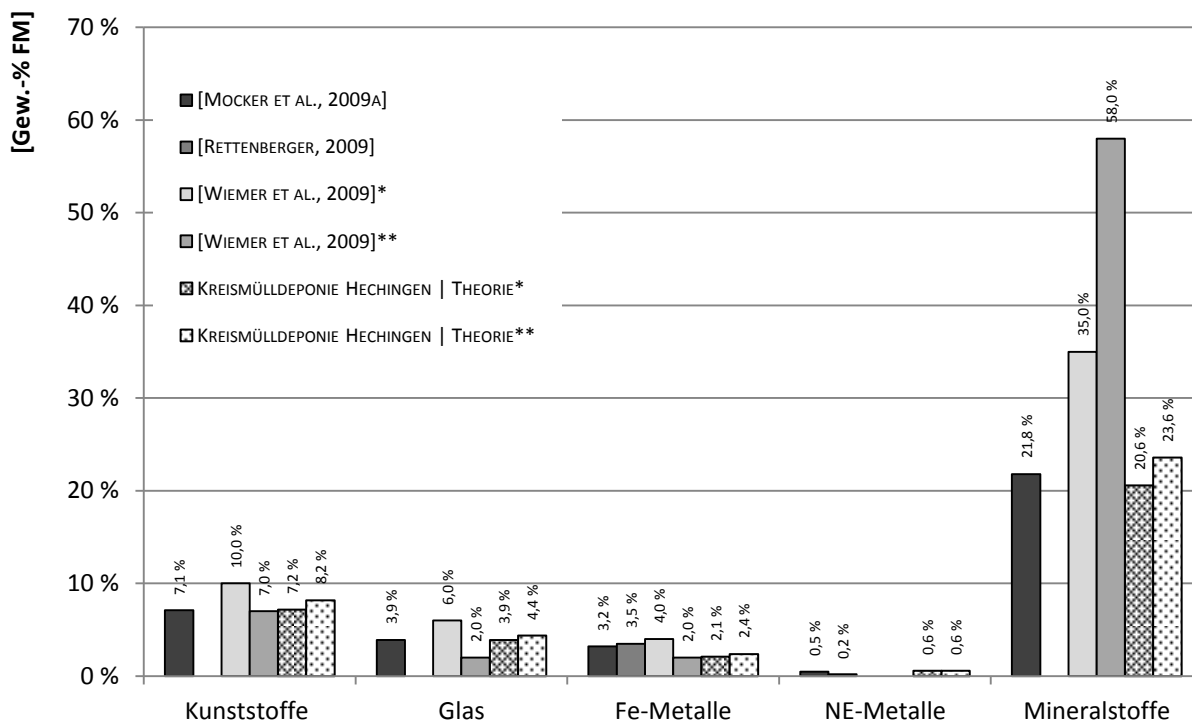


ABBILDUNG 157: GEGENÜBERSTELLUNG DES THEORETISCHEN RESSOURCENPOTENZIALS DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN ZU WERTEN DER LITERATUR | BEZUG ZUR FM

Mocker et al., 2009: Bezug zur FM ohne Abbau der organischen Substanz | bundesweite Analyse

Rettenberger, 2009: Bezug zur FM ohne Abbau der organischen Substanz | bundesweite Analyse (Teilabschätzung)

Wiemer et al., 2009*: Bezug zur FM mit 50-prozentigem Abbau der organischen Substanz | Deponie Kirschenplantage

Wiemer et al., 2009**: Bezug zur FM mit 50-prozentigem Abbau der organischen Substanz | 11 hessische Referenzdeponien

Kreismülldeponie Hechingen | Theorie*: Bezug zur FM ohne Abbau der organischen Substanz | Annahme des mittleren Stoffpotenzials bei mittlerer Ablagerungsmenge

Kreismülldeponie Hechingen | Theorie**: Bezug zur FM mit mittlerem Abbau der organischen Substanz | Annahme des mittleren Stoffpotenzials bei mittlerer Ablagerungsmenge

Wie im Rahmen der Arbeit aufgezeigt, führt die Berücksichtigung des stoffspezifischen Wassergehalts zu teilweise deutlichen Verschiebungen der gewichtsbezogenen Fraktionsanteile. Aufgrund der Tatsache, dass die Kreismülldeponie Hechingen einen vergleichsweise hohen Wasseranteil aufweist,

ist es notwendig, das theoretische Ressourcenpotenzial in Hinblick auf die TM darzustellen und vergleichend zu bewerten.

Hierzu existieren in der Literatur aktuell keine Angaben, sodass davon ausgegangen wird, dass die Modelle nach MOCKER ET AL. [2009A], RETTENBERGER [2009] und WIEMER ET AL. [2009] einen mittleren Wassergehalt der hier nicht genannten Stofffraktionen von 30 Gew.-% [orientiert an HAARSTRICK & HEMPEL, 2003] besitzen. Eine Reduktion der aufgeführten Fraktionen findet aufgrund ihrer stofflichen Eigenschaften nicht statt.

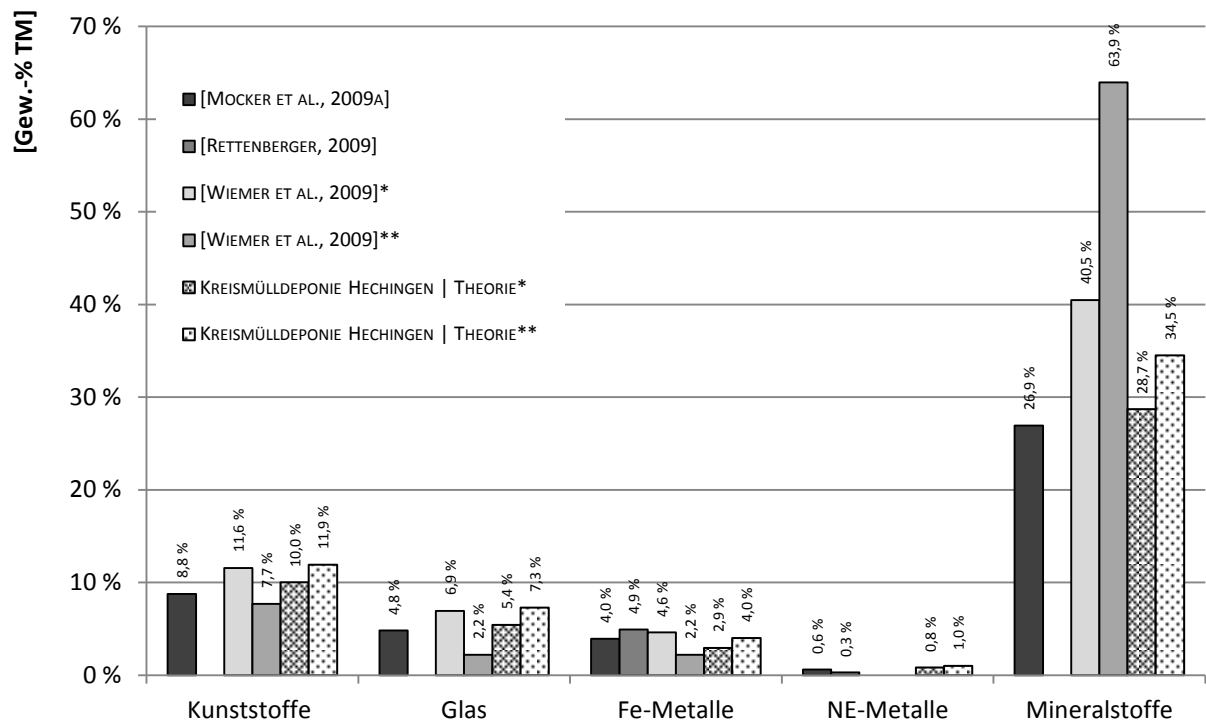


ABBILDUNG 158: GEGENÜBERSTELLUNG DES THEORETISCHEN RESSOURCENPOTENZIALS DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN ZU WERTEN DER LITERATUR | BEZUG ZUR TM

Mocker et al., 2009: Bezug zur TM ohne Abbau der organischen Substanz und unter Annahme eines 30-prozentigen Wasseranteils der nicht aufgeführten Stoffgruppen | bundesweite Analyse

Rettenberger, 2009: Bezug zur TM ohne Abbau der organischen Substanz und unter Annahme eines 30-prozentigen Wasseranteils der nicht aufgeführten Stoffgruppen | bundesweite Analyse (Teilabschätzung)

Wiemer et al., 2009*: Bezug zur TM mit 50-prozentigem Abbau der organischen Substanz und unter Annahme eines 30-prozentigen Wasseranteils der nicht aufgeführten Stoffgruppen | Deponie Kirschenplantage

Wiemer et al., 2009**: Bezug zur TM mit 50-prozentigem Abbau der organischen Substanz und unter Annahme eines 30-prozentigen Wasseranteils der nicht aufgeführten Stoffgruppen | 11 hessische Referenzdeponien

Kreismülldeponie Hechingen | Theorie*: Bezug zur TM ohne Abbau der organischen Substanz und unter Annahme eines 43-prozentigen Wasseranteils (Wassergehalt der Feinfraktion) der nicht aufgeführten Stoffgruppen | Annahme des mittleren Stoffpotenzials bei mittlerer Ablagerungsmenge

Kreismülldeponie Hechingen | Theorie**: Bezug zur TM mit mittlerem Abbau der organischen Substanz und unter Annahme stoffspezifischer Wassergehalte aller Fraktionen | Annahme des mittleren Stoffpotenzials bei mittlerer Ablagerungsmenge

Für die Kreismülldeponie Hechingen wird einerseits der mittlere Wassergehalt der Feinfraktion (Kreismülldeponie Hechingen | Theorie*) und andererseits der stoffspezifische Wassergehalt angenommen (Kreismülldeponie Hechingen | Theorie*). Die daraus resultierenden Verschiebungen der gewichtsbezogenen Stoffanteile werden aus Abbildung 158 deutlich.

Wie sich zeigt, ergibt sich unter den angenommenen Randbedingungen im Vergleich der Modelle eine deutliche Steigerung des Ressourcenpotenzials der Kreismülldeponie Hechingen. Diese ist nun im Potenzialbereich der Deponie Kirschenplantage einzuordnen und übertrifft mit Ausnahme der Fe-Metalle die mittleren bundesdeutschen sowie hessischen Erwartungswerte der aufgeführten Stofffraktionen.

Die gewichtsbezogenen Trockenmasseanteile der Kreismülldeponie Hechingen lassen somit den Schluss zu, dass die Kreismülldeponie Hechingen im bundesdeutschen Vergleich aufgrund ihrer Ablagerungshistorie und der dort abgelagerten rohstoffreichen Abfallarten (überwiegend Hausmüll, Gewerbeabfälle und Sperrmüll) ein überdurchschnittlich hohes Rohstoffpotenzial besitzt. Ein nutzeneffizienter und wirtschaftlicher Rückbau wäre demnach bereits wesentlich früher bzw. unter „schlechteren“ Randbedingungen denkbar als bei anderen Deponien.

Theoretische Modelle, die die meist sehr komplexe Umwelt beschreiben, sind aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren mit Unsicherheiten verbunden. In diesem Zusammenhang bergen stark reduzierte Modelle die Gefahr, dass maßgebliche Informationen für das Verständnis des beschriebenen Vorgangs oder Objekts unterschlagen werden [ENGELE, 1990].

Die bisher in der Literatur beschriebenen Modelle zur Ermittlung des theoretischen Ressourcenpotenzials nach MOCKER ET AL. [2009A], RETTENBERGER [2009] und WIEMER ET AL. [2009] verfolgen in diesem Kontext einen stark vereinfachten, statischen Ansatz. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Zusammensetzung einzelner Abfallarten über definierte Phasen einheitlich ist bzw. war. Die Abgrenzung dieser Phasen beruht zudem auf subjektiven Einschätzungen der Autoren.

Bei der im Rahmen dieser Arbeit aufgestellten teildynamischen Modellierung des theoretischen Ressourcenpotenzials der Kreismülldeponie Hechingen werden im Bereich des Hausmülls subjektive Schätzungen durch objektive Trendfunktionen ersetzt. Die Variationsbreite dieser Funktionen ermöglicht es zudem Fehlerabschätzungen vorzunehmen. Als problematisch ist in diesem Zusammenhang die regional zum Teil stark schwankende Hausmüllzusammensetzung anzusehen.

Historische Abfallmengen und -zusammensetzungen sind eng verbunden mit dem ökonomischen, kulturellen und politischen Kontext des jeweiligen Zeitabschnitts. Die Abfallbeschaffenheit veränderte sich in Abhängigkeit von wirtschaftlichen Bedürfnissen, technischen Möglichkeiten und politischen Forderungen [MAIER, 1999]. In diesem Zusammenhang sind zwar die wesentlichen Einflussfaktoren bekannt, jedoch kann ihre Wirkung auf die Abfallzusammensetzung noch nicht funktional abgeleitet werden. Aus aktueller Sicht stellt somit im Bereich des Hausmülls der im Rahmen dieser Arbeit verwendete lineare bundesdeutsche Trend eine Verbesserung zu den subjektiven Ausgangsmodellen dar, den es regionalspezifisch zu erweitern gilt.

Abfallmenge und -zusammensetzung werden maßgeblich von der Art des Gewerbebetriebs beeinflusst. Vor allem die Branche (z.B. Produktion, Handwerk, Einzelhandel, Dienstleistung, Erziehung und Unterricht etc.), in der das Gewebe lokalisiert ist, ist in diesem Kontext bedeutend [SALHOFER ET AL., 1996; BILDINGMAIER & KRANERT 2004].

Um dieser Tatsache im Rahmen der Potenzialanalyse gerecht zu werden, berücksichtigt das theoretische Modell die regionalspezifische Branchenzusammensetzung. Aufgrund fehlender Daten zur Entwicklung der Branchenzusammensetzung im Einzugsgebiet der Kreismülldeponie Hechingen musste auf aktuelle Kennwerte zurückgegriffen werden. Die zeitliche Entwicklung kann demnach nicht abgebildet werden, dennoch sollte dies zu einer Verbesserung der Modellergebnisse geführt haben.

Die einfachsten Modellannahmen mussten bedingt durch fehlende Literaturdaten im Bereich des Sperrmülls und Bauschutts angenommen werden. In diesem Zusammenhang konnten lediglich mittlere Zusammensetzungen hergeleitet werden, die keine zeitlichen Entwicklungen und regionale Unterschiede widerspiegeln. Die resultierenden Fehleinschätzungen können aufgrund der geringen Ablagerungsmenge von Sperrmüll und Bauschutt auf der Kreismülldeponie Hechingen als gering eingestuft werden.

MOCKER ET AL. [2009A] und RETTENBERGER [2009] berücksichtigen in Ihrer Betrachtung keine Abbauprozesse der organischen Substanz. WIEMER ET AL. [2009] beziffern in Ihrer Studie diesen hingegen mit einem fixen Wert von 50 % der organischen Substanz.

Die Modifizierung und Einbindung vorhandener Gasprognosemodelle zur Simulation des Abbaus der organischen Substanz kann als eine weitere Verbesserung der Modellergebnisse und –genauigkeit angesehen werden. Hierbei gilt es zu klären, in wie weit komplexere Modelle eine weitere Verbesserung herbeiführen können. Untersuchungen im Rahmen der Deponiegasbildung und -prognose haben jedoch gezeigt, dass die Verwendung von Multi-Substrat-Modellen keine wesentliche Verbesserung gegenüber einfachen Ansätzen bringt [KRÜMPELBECK, 2000].

Insgesamt konnte im Rahmen der theoretischen Ressourcenpotenzialermittlung dieser Arbeit eine Modellverbesserung der vorhandenen Ansätze vorgenommen werden. Wie sich aber auch zeigt, liegen Theorie und Realität für einzelne Stofffraktionen noch weit auseinander. Größere Unterschätzungen des realen Ressourcenpotenzials der Kreismülldeponie Hechingen treten in diesem Zusammenhang für Textilien, die Rest- und Feinfraktion sowie Kunststoffe auf. Deutliche Überschätzungen sind hingegen für Stoffe ang., Verpackungen, komplexe Produkte, PPK, Schadstoffe und Organik zu erkennen. Hierin ist weiterer Forschungs- und Handlungsbedarf zur Modelloptimierung zu sehen (Abbildung 159).

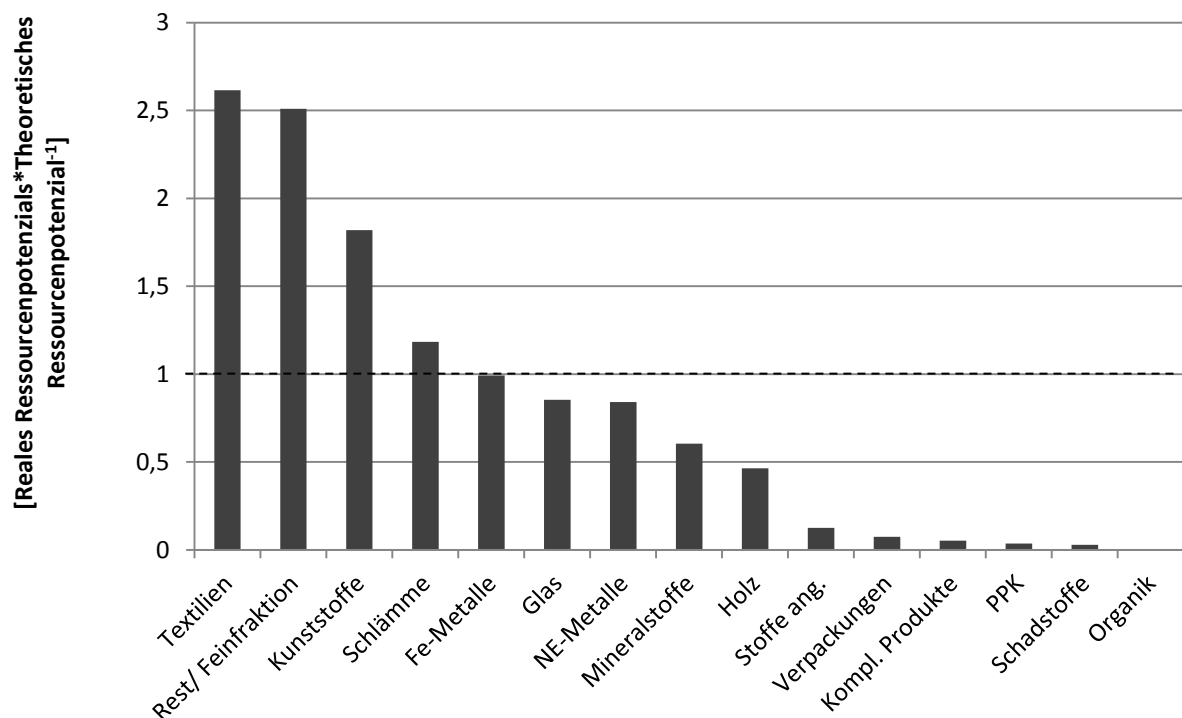


ABBILDUNG 159: ÜBER- UND UNTERSCHÄTZUNG DES REALEN RESSOURCENPOTENZIALS DURCH DAS THEORETISCHE RESSOURCENPOTENZIAL DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN (MITTEWERTE)

In Hinblick auf die Verwertung und Vermarktung der Metalle sowie einer heizwertreichen Fraktion ergeben sich deutlich bessere Übereinstimmungen des ermittelten theoretischen und realen Ressourcenpotenzials der Kreismülldeponie Hechingen.

Wie Abbildung 160 zu entnehmen ist, treten in diesem Zusammenhang lediglich Abweichungen von 1 - 5 Gew.-% auf. Insgesamt bietet das vorliegende Modell somit eine gute Möglichkeit, den Metall- und Energiewert einer Deponie abzuschätzen.

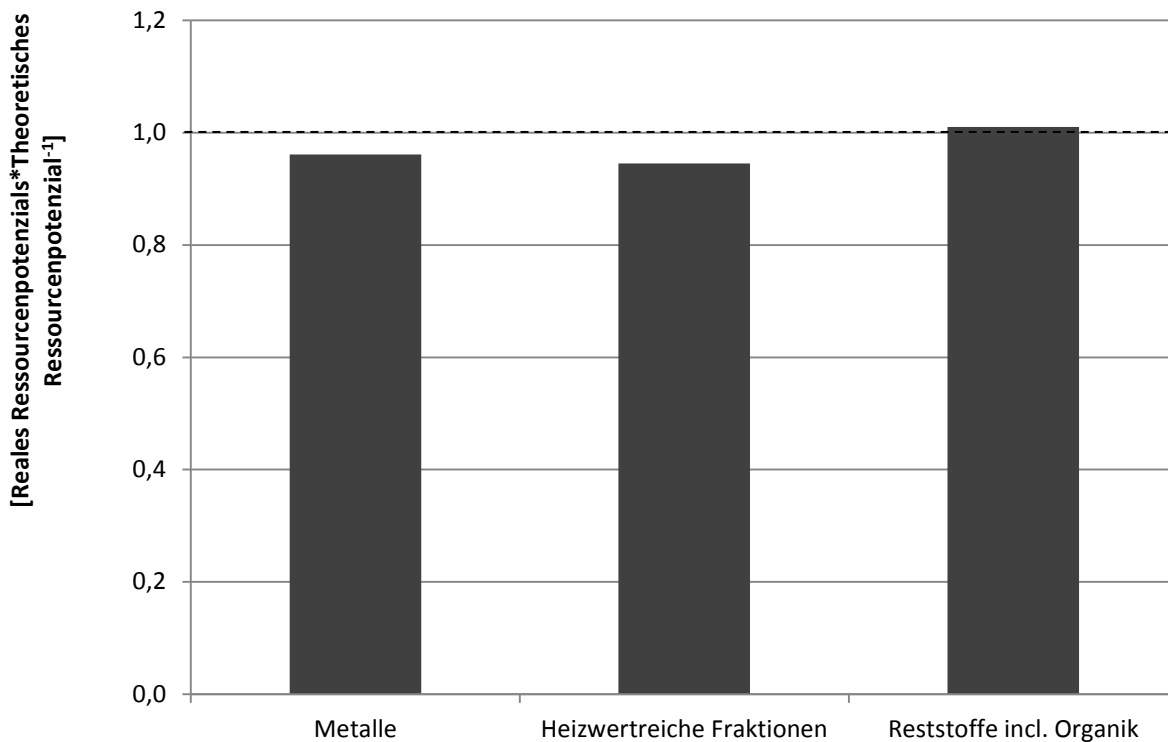


ABBILDUNG 160: ÜBER- UND UNTERSCHÄTZUNG DES REALEN RESSOURCENPOTENZIALS DURCH DAS THEORETISCHE RESSOURCENPOTENZIAL DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN IN HINBLICK AUF DIE VERWERTUNG VON METALLEN UND EINER HEIZWERTREICHEN FRAKTION (MITTEWLERTE)

Das reale Ressourcenpotenzial beschreibt die im Rahmen von Sortieranalysen ermittelte Zusammensetzung eines Deponiekörpers. Die in der Literatur bekannten und dokumentierten Ergebnisse wesentlicher landfill mining Projekte sowie deren Einordnung in Bezug auf die Erkenntnisse der Kreismülldeponie Hechingen werden aus Abbildung 161 deutlich.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass aufgrund unterschiedlicher Methodiken und Fragestellungen der Analysen nur ein Teil der im Rahmen dieser Arbeit aufgegriffenen Stofffraktionen betrachtet werden können. Soweit vorhanden, wurde versucht Metalle in Fe- und NE-Metalle zu gliedern. Sollten hierbei Werte vorliegen, ergibt sich der Gesamtmetallgehalt aus der Summe beider Fraktionen. Die dargestellten Werte der Kreismülldeponie Hechingen | Real* beschreiben in diesem Zusammenhang das mittlere zu erwartende Rohstoffpotenzial. Das Szenario Kreismülldeponie Hechingen | Real** zeigt hingegen die maximal zu vermuteten Gehalte der Stofffraktionen unter Annahme des 97,5%-Quantils.

Insgesamt ermöglicht die Abbildung, das reale Ressourcenpotenzial der Kreismülldeponie Hechingen vergleichend darzustellen und zu bewerten.

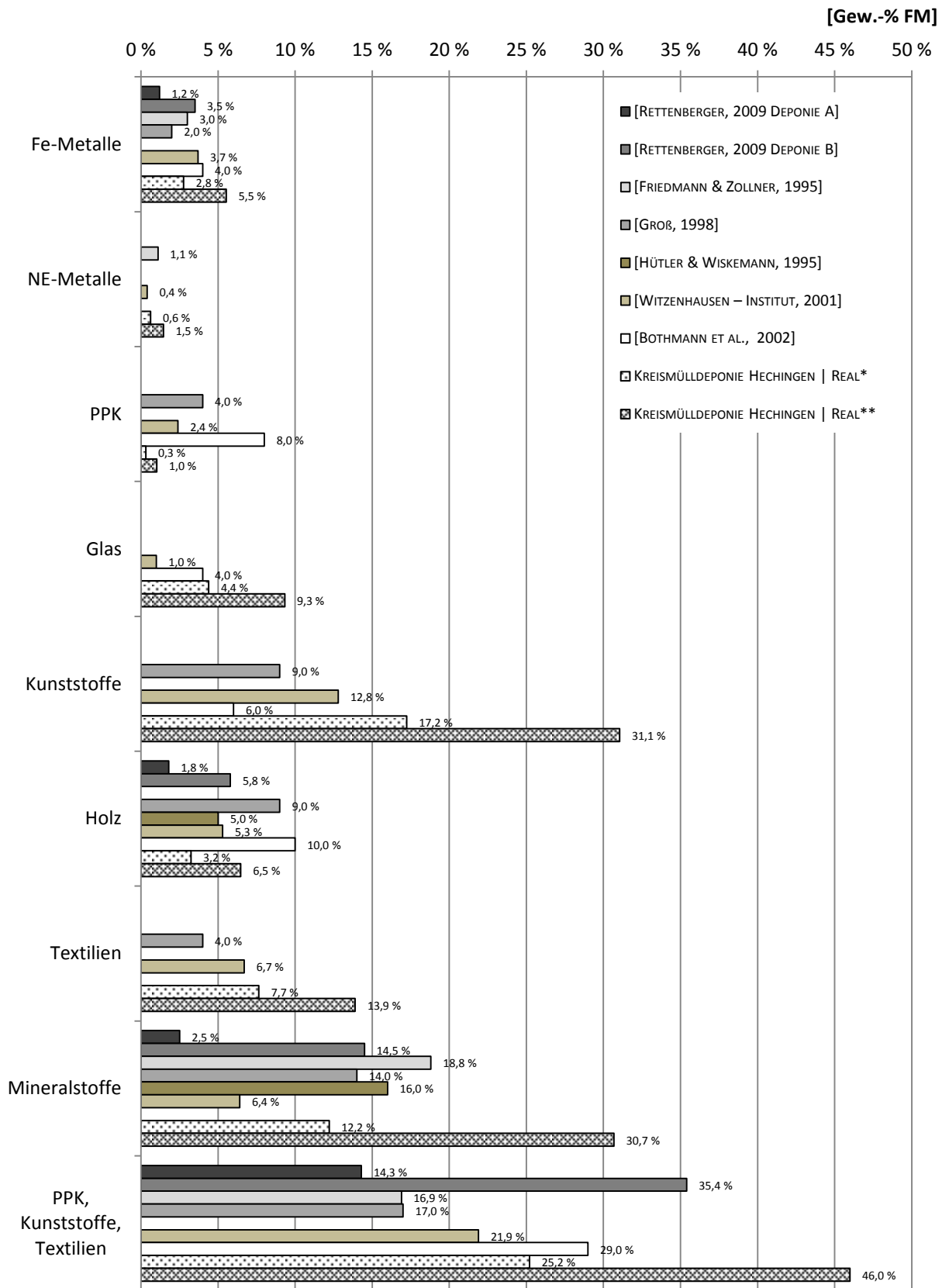


ABBILDUNG 161: VERGLEICHENDE DARSTELLUNG DES REALEN RESSOURCENPOTENZIALS DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN MIT ERGEBNISSEN ÄHNLICHER VORHABEN BZW. STATTFUNDENER RÜCKBAUPROJEKTE

Kreismülldeponie Hechingen | Real*: Zusammensetzung des Deponieguts über alle Deponiechargen | Mittelwert

Kreismülldeponie Hechingen | Real**: Zusammensetzung des Deponieguts über alle Deponiechargen | 97,5%-Quantil

Der Gehalt an Metallen im Deponiekörper schwankt nach Angaben der Literatur zwischen 1,2 und 4,1 Gew.-% der FM. Im Mittel konnten im Deponiekörper der Kreismülldeponie Hechingen ca. 3,4 Gew.-% FM Metalle vorgefunden werden. Dieser Wert ähnelt den Angaben von RETTENBERGER [2009 DEPONIE B], wobei die Ursache in einer ähnlichen Abfallartenzusammensetzung und -ablagerung gesehen werden könnte. Wie die Kreismülldeponie Hechingen besitzt auch Deponie B einen Siedlungsabfallanteil von rund 50 Gew.-% FM.

Es sei erwähnt, dass die genannten Maximalwerte des Fe- und NE-Gehalts der Kreismülldeponie Hechingen alle anderen Annahmen übersteigen. Punktuell sind solche Metallgehalte durchaus denkbar, in Bezug auf das Gesamtbild und im hier gezeigten Vergleich erscheint dieser Wert jedoch als zu hoch angesetzt.

Untersuchungen zum Anteil an NE-Metallen liegen nur sehr begrenzt vor. Der Vergleich zu FRIEDMANN & ZOLLNER [1995] und einer Deponie im Westerwaldkreis [WITZENHAUSEN – INSTITUT, 2001] lässt vermuten, dass diese im Deponiekörper zu 0,5 bis 1,0 Gew.-% der FM auftreten.

Selbst bei Betrachtung maximaler PPK-Gehalte erreicht die Kreismülldeponie Hechingen bei weitem nicht die PPK-Anteile der aufgeführten Untersuchungen. Als Grund hierfür können die stark feuchten Milieubedingungen der Kreismülldeponie Hechingen angenommen werden. Hierdurch ist der Abbau von PPK bereits weit fortgeschritten. Es ist zu vermuten, dass - sollten im Rahmen eines Rückbaus trockene Deponiebereiche angetroffen werden - der PPK-Anteil entsprechend höher ausfallen wird. Untersuchungen von FRIEDMANN & ZOLLNER [1995] zeigen, dass 15 Jahre alte Zeitungen gut erhalten und lesbar waren.

Rückstände von Glas treten in allen Untersuchungen zu unter 10 Gew.-% der FM aus. Die Kreismülldeponie Hechingen besitzt in diesem Zusammenhang einen mittleren Anteil von 4,4 Gew.-% FM, der mit Ergebnissen von BOTHMANN ET AL. [2002] vergleichbar ist.

Der Gehalt an heizwertreichen Kunststoffen auf der Kreismülldeponie Hechingen ist als hoch einzustufen. Mit ca. 17,2 Gew.-% FM machen diese einen etwa doppelt so hohen Anteil aus, als von GROß [1998] aufgezeigt. Der wesentlich niedrigere Wert nach BOTHMANN ET AL. [2002] resultiert aus der Tatsache, dass auf der untersuchten Deponie überwiegend inerte Materialien abgelagert wurden. Für durchschnittliche Hausmülldeponien erscheinen daher Kunststoffanteile von 13,0 – 17,0 Gew.-% FM denkbar. Der angegebene Maximalwert von 31,1 Gew.-% FM ist eher unrealistisch und wie im Fall der Metalle ausschließlich punktuell vorzufinden.

Für die Stofffraktion Holz zeigt sich, dass das Potenzial der Kreismülldeponie Hechingen vergleichsweise gering einzustufen ist. Erst unter Berücksichtigung des Szenarios Kreismülldeponie Hechingen | Real** können die Werte der aufgeführten Untersuchungen erreicht werden.

Aufgrund der Branchenzusammensetzung des Einzugsgebiets der Kreismülldeponie Hechingen wurde vermutet, dass ein vergleichsweise hoher Textilanteil im Deponiegut vorgefunden wird. Zwar liegt dieser mit durchschnittlich 7,7 Gew.-% der FM über dem der übrigen Untersuchungen, jedoch fallen die Auswirkungen deutlich geringer aus als zuvor vermutet.

Mit Ausnahme der Ergebnisse von RETTENBERGER [2009 DEPONIE A] und WITZENHAUSEN – INSTITUT [2001] ist der Anteil an Mineralstoffen als relativ konstant anzusehen. Diese schwanken dabei von 12,2 bis 18,8 Gew.-% FM.

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

Die Kreismülldeponie Hechingen ist mit durchschnittlich 25,2 Gew.-% FM eigenen Untersuchungen des WITZENHAUSEN – INSTITUTES [2001] und BOTHMANN ET AL. [2002] sehr nahe. Im Fall der Deponie A resultiert der verhältnismäßig geringe Anteil dieser Stofffraktionen aus einem dort abgelagerten großen Anteil an Gießereisanden und Gewerbeabfällen. Die betrachtete und mit der Kreismülldeponie Hechingen vergleichbare Deponie B zeichnet sich hingegen durch Gehalte von 35,4 Gew.-% FM aus [RETTENBERGER, 2009]. Aufgrund ähnlicher Ablagerungsbedingungen dieser Deponien ist zu vermuten, dass das Potenzial der Kreismülldeponie Hechingen höher anzusetzen ist und somit zwischen 25,0 und 46,0 Gew.-% FM liegen dürfte.

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

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

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

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

Nicht nur das Arbeiten mit theoretischen Modellen birgt eine Vielzahl an Unsicherheiten sondern auch praktische Untersuchungen und Analysen. Im Rahmen der Arbeit konnten insgesamt 9 unterschiedliche Bereiche der Kreismülldeponie Hechingen hinsichtlich ihrer stofflichen Eigenschaften untersucht werden. Aus methodischen Gründen konnte hierbei keine gezielte und nutzenorientierte Festlegung der jeweiligen Bohrpunkte erfolgen. Die flächenhafte Interpretation ist somit eingeschränkt aussagekräftig.

In Hinblick auf die Klassierung und Sortierung des Deponieguts ergeben sich aus dem eingesetzten Bohrverfahren folgende Probleme bzgl. der Ergebnisinterpretation.

- Durch die zerkleinernde Wirkung der am Kopf der Bohrschnecke befindlichen Meißel, ist eine zusätzliche Zerkleinerung des Deponiegut zu erwarten.
- Größere Deponiegüter können aufgrund der technischen Ausführung der Bohrschnecke nicht erfasst werden, vielmehr werden diese zerkleinert oder verdrängt.
- Schlammiges Material rutscht beim Versuch des Aushubs aus der Bohrschnecke und kann nicht gefördert werden.

Eine Abschätzung der hieraus möglicherweise resultierenden Fehler ist nicht möglich. Es kann vermutet werden, dass bei einem großtechnischen Rückbau eine Reduktion des Feinanteils stattfinden wird. Ebenfalls werden sperrige Stofffraktionen bzw. komplexe Produkte ihren Anteil steigern können.

Neben diesen technisch bedingten Einschränkungen stellen auch mögliche subjektive Einschätzungen im Rahmen des manuellen Sortierprozesses eine Unsicherheit dar.

Der Vergleich der gewonnenen Ergebnisse mit ähnlichen Vorhaben ist nur bedingt möglich. Dabei treten vor allem Probleme bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse auf. Für die Zukunft sollte in diesem Zusammenhang eine einheitliche Vorlage wie bspw. in Form eines Leitfadens „Deponiegutsortierung und -analyse“ entworfen und angewandt werden. Hieraus würde neben einer

deutlichen Steigerung der Vergleichbarkeit auch die Möglichkeit zur Übertragung resultieren. Eine stärkere Zusammenarbeit der einzelnen Akteure auf diesem Gebiet wäre wünschenswert.

6.1 DEPONIE ALS RESSOURCENQUELLE

ROHSTOFFQUELLE

Die Verwertung von Metallen aus Deponien scheint mit Blick auf die in den letzten Jahren stark angestiegenen Sekundär- und Primärrohstoffpreise geboten [FAULSTICH ET AL., 2010]. Zudem werden Importabhängigkeiten aufgrund fehlender inländischer Rohstoffvorkommen in diesem Kontext als weiterer kritischer Faktor angesehen [BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE, 1999]. Zukünftig müssen daher Wege gefunden werden, den zunehmenden Reichtum infolge des Ressourcenbooms zu einer nachhaltigen Entwicklung der regionalen Wirtschaftsstruktur zu nutzen [BARDT, 2005].

Erheblicher Anpassungsbedarf entsteht hierbei vor allem für Verbraucherländer wie Deutschland, deren Wirtschaft auf die Nutzung und den Import von Rohstoffen angewiesen ist. Anpassungsreaktionen wie bspw. die Nutzung anthropogener Rohstoffquellen können hier partiell einen Ausgleich bieten [BARDT, 2006].

Untersuchungen von RETTENBERGER [2009] kommen in diesem Zusammenhang zum Ergebnis, dass das Potenzial der in deutschen Siedlungsabfalldeponien enthaltenen Rohstoffe vergleichsweise hoch einzuschätzen ist. Gemessen am deutschen Jahresverbrauch können demnach etwa 50 % des jährlichen Aluminiumbedarfs, 124 % des jährlichen Eisenbedarfs und 142 % des jährlichen Kupferbedarfs gedeckt werden.

Die aktuelle deutsche Roheisenproduktion kann mit ca. 20,1 Mio. Mg*a⁻¹ angegeben werden [WIRTSCHAFTSVEREINIGUNG STAHL, 2010]. Unter Berücksichtigung der Bevölkerungszahl Deutschlands (ca. 82.000.000 Mio. Menschen) errechnet sich ein spezifischer Verbrauchsfaktor von etwa 240 kg Roheisen pro Einwohner und Jahr. In Verbindung mit ca. 44.590 Mg Fe-Metallen, die auf der Kreismülldeponie Hechingen lagern, könnte somit der Jahresverbrauch an Roheisen von 182.819 Einwohnern gedeckt werden. Diese Zahl entspricht in etwa der Einwohnerzahl des Zollernalbkreises, sodass festzuhalten ist, dass der Fe-Gehalt der Kreismülldeponie Hechingen den Roheisenbedarf des Zollernalbkreises für ca. 1 Jahr decken könnte.

Der deutsche Kupferverbrauch kann mit etwa 15,8 kg pro Einwohner und Jahr beziffert werden [VON ARX, 2006]. Bei einer auf der Kreismülldeponie Hechingen vermuteten Kupfermenge von 4.078 bis 5.825 Mg könnten insgesamt 258.000 bis 369.000 Menschen ihren spezifischen Jahresverbrauch decken. Anders ausgedrückt lagert auf der Kreismülldeponie Hechingen 1,4 – 1,9 mal mehr Kupfer als pro Jahr im Zollernalbkreis benötigt würde.

Im Fall des Aluminiums kann ein spezifischer Jahresverbrauch von ca. 36,4 kg pro Einwohner und Jahr angesetzt werden.⁸ Das Vorkommen an Aluminium im Deponiekörper der Kreismülldeponie

⁸ Errechnet sich aus der Division des Gesamtverbrauchs an Aluminium des Jahres 2003 (2.987.000 Mg) und der deutschen Bevölkerungszahl (82.000.000 Einwohner) [UMWELTBUNDESAMT, 2007]

Hechingen liegt bei etwa 4.660 bis 5.243 Mg. Entsprechend könnte hiermit der spezifische Jahresverbrauch von 128.000 bis 144.000 Menschen gedeckt werden.

Darüber hinaus leistet das Recycling von Sekundärrohstoffen einen wesentlichen Beitrag zum Umweltschutz und trägt mittlerweile entscheidend zur nationalen und internationalen Rohstoffversorgung bei [UMSICHT, 2008]. Wie gezeigt, könnten demnach durch den Rückbau der Kreismülldeponie Hechingen regionale Versorgungsengpässe über einen längeren Zeitraum abgepuffert werden und Abhängigkeiten relativiert werden.

ENERGIEQUELLE

Aufgrund vorhandener hochkalorischer Bestandteile wie Kunststoffe, Textilien etc. ist der energetische Wert einer Deponie grundsätzlich gegeben.

Hierbei zeigen FAULSTICH ET AL. [2010] in einer ersten Abschätzung, dass der Energiegehalt deutscher Deponien auf ca. 7.733 Petajoule geschätzt werden kann, womit ca. 50 % des jährlichen bundesweiten Primärenergiebedarfs gedeckt werden könnte. Nach Angaben der Autoren ist allein das Energiepotenzial bayrischer Deponien auf 1.131 Petajoule zu beziffern und damit nahezu identisch zum Potenzial österreichischer Deponien.

Auch RETTENBERGER [2009] kommt mit ca. 8.000 Petajoule auf einen ähnlichen Energiegehalt deutscher Deponien und macht gleichzeitig darauf aufmerksam, dass der gewinnbare Anteil geringer einzuschätzen ist.

Unter Berücksichtigung der jeweils angenommenen Grundmengen ergeben sich spezifische Energiegehalte der FM von ca. 4,5 – 10,7 GJ*Mg⁻¹ Deponiegut. Der spezifische Energiegehalt der Kreismülldeponie Hechingen kann in diesem Kontext auf ca. 4,7 GJ*Mg⁻¹ Deponiegut beziffert werden. Als Hauptursache für diesen eher niedrigen Energiewert kann der vergleichsweise hohe Wassergehalt einzelner heizwertreicher Fraktionen angesehen werden, der im Rahmen des Berechnungsmodells berücksichtigt wurde. Es ist zu vermuten, dass durch Austrocknung des Deponiekörpers der Kreismülldeponie Hechingen der spezifische Energiegehalt zukünftig steigen wird.

Die Frage, die sich in diesem Zusammenhang auch stellt, ist, ob der Energiegehalt einer Deponie größer ist als jene Energie, die benötigt wird, um die im Deponiekörper gespeicherte Energie freizusetzen.

In diesem Zusammenhang kommt RETTENBERGER [2009] bei einer Wirtschaftlichkeitsberechnung für eine Hausmülldeponie mit einer Ablagerungsmasse von 500.000 Mg zu dem Entschluss, dass die energetische Bilanz des Deponierückbaus deutlich positiv ausfällt. „Selbst ohne Wärmenutzung wird bei einem Rückbau 5 bis 15 mal so viel nutzbare Energie erzeugt, als für den Rückbau benötigt wird“ [RETTENBERGER, 2009].

Hierbei ergibt sich unter Berücksichtigung spezifischer Kenngrößen nach HÖLZLE [2010], dass der nutzbare Energiegehalt der Kreismülldeponie Hechingen in Abhängigkeit unterschiedlicher Wirkungsgrade von Kraftwerken und ohne die Bewertung von Transportenergie ca. 5 bis 40 mal höher als der benötigte Energieinput ist. Bei durchschnittlichen Energieverbräuchen für den Transport von 0,03 bis 0,12 GJ*Mg⁻¹ reduziert sich diese Spannweite auf etwa 3 bis 30.

Aus energetischer Sicht ist der Rückbau der Kreismülldeponie Hechingen demnach positiv zu bewerten. Interessenten für die heizwertreiche Fraktion könnten bspw. energieintensive Industrien und Verbrennungsanlagen mit Überkapazitäten sein [HÖLZLE, 2010].

Die im Rahmen der Analysen aufgestellten Energiepotenziale der Kreismülldeponie Hechingen stellen rein rechnerische Werte dar. Um dennoch eine möglichst genaue Abschätzung der realen

Bedingungen zu simulieren, wurden die vorgefundenen Stofffraktionsanteile entsprechend in den Berechnungen berücksichtigt. Es ist daher davon auszugehen, dass der reale Energiegehalt der Kreismülldeponie Hechingen ähnlich hoch sein dürfte.

Ein Indiz hierfür stellt der Vergleich zu Berechnungen nach FAULSTICH ET AL. [2010] und RETTENBERGER [2009] dar. Durch konkrete Heizwertuntersuchungen sollte dies vor einem großtechnischen Rückbau der Kreismülldeponie Hechingen geprüft werden.

6.2 RÜCKBAU ODER NACHSORGE

Alle im Rahmen dieser Arbeit aufgezeigten Kosten/-Nutzenszenarien der Kreismülldeponie Hechingen belegen, dass ein nutzeneffizienter Rückbau innerhalb der kommenden 50 Jahre denkbar erscheint. Dabei tragen die steigende Nachfrage nach mineralischen Rohstoffen und Energie, technische Weiterentwicklungen der Recyclingbranche sowie sinkende Kosten der Reststoffentsorgung entscheidend zur Bewertung bei.

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

Die in der Literatur beschriebenen Einzelprojekte des landfill minings zeigen mit wenigen Ausnahmen ebenso positive Ergebnisse hinsichtlich des Kosten-/Nutzenverhältnisses auf, sodass mittlerweile auch verstärkt Privatunternehmen das Ressourcenpotenzial von Deponien erkennen [VAN DER ZEE ET AL., 2004].

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

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

Die genannten Randbedingungen führen dazu, dass entgegen den Annahmen von WITTMAIER & WOLFF [2011] in naher Zukunft ein Deponierückbau zur Gewinnung von Rohstoffen aus marktwirtschaftlichen Gesichtspunkten interessant wird und Vorteile gegenüber der Nachsorge

bietet. Zudem gibt landfill mining rohstoffarmen Nationen die Möglichkeit, Abhängigkeiten von Zulieferstaaten in einem gewissen Maße zu mindern.

Problematisch anzusehen ist in diesem Zusammenhang, dass Deponierückbauprojekte meist über mehrere Jahre andauern und demnach auch den jeweiligen Preisschwankungen auf den Märkten unterliegen. Ebenso können behördliche Anforderungen und öffentliches Interesse ein Hindernis darstellen [HÖLZLE, 2010].

Dem gegenüber steht die kostenintensive Nachsorgephase einer Deponie. Hierbei ist jedoch unbekannt, wie lange diese tatsächlich andauert und welche Folgekosten entsprechend entstehen [WOLFGARTEN, 2010].

Insgesamt sind unsere Deponien Depots, in denen werthafte Rohstoffe lagern. Hierbei erfordert nachhaltiges Handeln schon heute das vorsorgende Denken an morgen [GÄTH, 2011].

Aus technischer Sicht ist die Aufbereitung rückgebauter Abfälle unter Einsatz gängiger Techniken der Recyclingbranche bereits heute denkbar [MOCKER ET AL., 2009B]. Allenfalls die Optimierung einzelner Aufbereitungsschritte in Hinblick auf die heterogenen Deponieguteigenschaften (z.B. Wassergehalt etc.) kann als neue Aufgabe und Herausforderung gesehen werden.

Offen bleibt in diesem Zusammenhang weitestgehend die Frage der praxisnahen, großtechnischen Umsetzung eines Deponierückbaus. In diesem Zusammenhang sollten aus wissenschaftlicher Sicht folgende Aspekte geklärt werden:

- Erfassung der qualitativen und quantitativen Materialströme und Vergleich zu vorliegenden manuellen Untersuchungen (Stoffstromanalysen, Input-Output Analysen)
- Erkundung und Auswirkungsanalyse differenzierter Aufbereitungstiefen und -techniken
- Identifikation und Bewertung spezifischer und technisch möglicher Rückgewinnungsquoten mit besonderem Augenmerk auf Wertstoffe wie Aluminium, Kupfer, andere wertvolle Technologiemetalle, qualitativ hochwertige Sekundärbrennstoffe sowie Abfallstoffe
- Ökologische und ökonomische Berücksichtigung und Charakterisierung logistischer Möglichkeiten bzw. Grenzen
- Erarbeitung von potenziellen technischen Basisdaten zur Ableitung ökologischer und ökonomischer Planungsdaten im Rahmen der großmaßstäbigen Aufbereitung von Deponierückbaustoffen

In der Literatur liegen zu dieser Fragestellung nur wenige Informationen vor, die zumeist auf theoretischen Annahmen basieren. Im Abbau und der Aufdeckung dieser Defizite sollte daher das zukünftige Interesse liegen.

Zudem ist derzeit die Frage der Nachsorgedauer einer Deponie ein entscheidender Faktor. Hierbei liegen aus gesetzlicher Sicht nur unzureichende Vorgaben vor. Zudem kann aktuell nicht abgeschätzt werden, ob installierte Anlagen zur Nachsorge diese Phase überstehen oder weitere Kosten verursachen.

Auch in Hinblick auf diese Defizite und Fragestellungen stellt der Deponierückbau eine nutzeneffiziente Lösung dar.

Misstände vergangener Zeiten nachhaltig zu nutzen, sollte das Interesse von heute sein. Hierbei stellt der Rückbau von Deponien eine zukünftige Alternative dar, die unter definierten Voraussetzungen schon heute denkbar und nutzeneffizient realisierbar wäre.

7 ZUSAMMENFASSUNG

Primäre Ressourcen wie Stahl und Energie werden in zunehmendem Maße knapper und damit immer wertvoller. Dazu trägt in erster Linie die steigende Nachfrage nach Rohstoffen bei.

Aus aktueller Sicht wird sich an dieser Situation nichts ändern. Es ist eher zu erwarten, dass sich die Marktlage noch drastischer entwickelt [RWI ESSEN ET AL., 2006].

Neben in Nutzung befindlichen anthropogenen Rohstofflagern bilden Hausmülldeponien ungenutzte Rohstoffdepots, deren tatsächliches Ressourcenpotenzial in den meisten Fällen unbekannt ist.

Auf Hausmülldeponien wie der Kreismülldeponie Hechingen wurden in diesem Zusammenhang Abfälle zur Beseitigung unvorbehandelt abgelagert. Dementsprechend sind alle Stofffraktionen, die auch heute in unseren Getrenntsammlersystemen anfallen, innerhalb des Deponiekörpers zu vermuten.

Dies bedeutet letztlich, dass Hausmülldeponien wie die Kreismülldeponie Hechingen anthropogene Rohstofflager darstellen, deren Inhalt und Werthaftigkeit von der Nutzung und der Nutzungsdauer abhängig ist. Es wird erwartet, dass die Nutzung der in den Deponien enthaltenen Rohstoffe durch Rückbau mit steigender Rohstoffknappheit wirtschaftlich erforderlich und nutzeneffizient ist.

Ziel der Arbeit ist es, eine ganzheitliche Bewertung des Rückbaus der Kreismülldeponie Hechingen aufzustellen und somit die zentrale Frage zu beantworten, unter welchen Randbedingungen die umweltverträgliche Aufbereitung und Nutzung deponierter Ressourcen wirtschaftlicher sowie nutzeneffizienter sein könnte, als die alternativ notwendige Deponienachsorge.

Zur Ermittlung des Ressourcenpotenzials der Kreismülldeponie Hechingen wird im Rahmen dieser Arbeit ein theoretischer und realer Ansatz verfolgt.

Hierbei beruht das theoretische Ressourcenpotenzial auf zeitspezifischen Primär- und Sekundärstatistiken, die die abfallwirtschaftliche Situation des Einzugsgebiets einer Deponie charakterisieren und bestimmen. Dabei liegen sämtliche Daten, die in die Modellierung einfließen, bereits in Form von Literaturwerten, Untersuchungsergebnissen anderer Projekte, betriebseigenen Datenbanken, Höhenmodellen der Massenermittlung oder Archivmaterial vor. Die daraus ermittelten spezifischen Ablagerungsmengen und Abfallzusammensetzungen bilden die Grundlage der theoretischen Potenzialermittlung. Zudem werden die Abbau- und Umbauprozesse einzelner Stoffgruppen innerhalb des Deponiekörpers simuliert und in die Berechnung integriert.

Neben der theoretischen Abschätzung des Ressourcenpotenzials von Hausmülldeponien stellen direkte Deponiegutuntersuchungen in Form von Sortieranalysen eine Möglichkeit zur Abbildung des Rohstoffwerts dar. Die Verschneidung vorhandener Ablagerungsmengen mit den Erkenntnissen zum lagespezifischen Vorkommen einzelner Abfallarten und deren charakteristischer Zusammensetzung (reale Sortieranalysen des Deponieguts der Kreismülldeponie Hechingen) liefert letztlich das reale Ressourcenpotenzial einer Deponie [GÄTH & NISPEL, 2011].

Bedingt durch fehlende lage- und funktionsspezifische Dokumentation abgelagerter Abfallarten gestaltet sich die Rekonstruktion der Ablagerungsmenge teilweise schwierig. Zudem treten zwischen einzelnen Dokumentationsquellen unterschiedliche Abfallbezeichnungen auf, die es sinnvoll zu kombinieren gilt.

Hierbei hat sich gezeigt, dass die Vereinfachung der teils komplexen Abfallbezeichnung auf die Abfallarten

- Hausmüll,
- Gewerbeabfall,
- Sperrmüll,
- Sande,
- Bauschutt,
- Erdaushub/Rekultivierungsmaterial und
- Schlämme

ausreichende Qualität für Folgeuntersuchungen der Rohstoffpotenzialabschätzung liefert und spezifische Unsicherheiten hervorhebt.

Soweit möglich, sollten neben massen- auch volumenbezogene Ablagerungsaufzeichnungen herangezogen werden. Diese ermöglichen zum einen die Validierung gewichtsbezogener Ablagerungsannahmen und zum anderen die räumliche sowie jahresspezifische Abgrenzung des betroffenen Ablagerungsbereichs.

Für die Kreismülldeponie Hechingen konnte hierdurch gezeigt werden, dass sich der Aufbau des Deponiekörpers kontinuierlich entlang des ehemals vorhandenen Hangs entwickelte. Dabei erfolgte die Ablagerung der Abfälle in Schichten, deren Mächtigkeit im Wesentlichen von der jeweils zur Verfügung stehenden Fläche abhing. Zudem ist zu vermuten, dass mittlere Einbaudichten von $1,16 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ erzielt wurden.

Auf Basis dieser Tatsache kann ein signifikanter Zusammenhang zwischen Untersuchungstiefe (Höhe über NN) und Alter der Ablagerung funktional beschrieben werden.

Insgesamt zeigen die aufgestellten Ablagerungsszenarien sowohl innerhalb der Abfallarten als auch in Bezug auf die Gesamtablagerung nur geringe Variationen auf. Entsprechend hoch ist die Güte dieser Einschätzung einzustufen.

Der untersuchte Wassergehalt der Kreismülldeponie Hechingen beschreibt auf den ersten Blick ein sehr diffuses Bild. Hierbei zeigen bohrlochspezifische Untersuchungen keine Muster eines Tiefenprofils auf. Vielmehr ist zu vermuten, dass der Wasserhaushalt des Deponiekörpers aufgrund seines Aufbaus von wasserführenden und –stauenden Schichten durchzogen ist.

Untersuchungen des Wassergehalts der Fraktion $< 35 \text{ mm}$ lassen tendenziell erkennen, dass mit zunehmender Höhe über NN geringere Wassergehalte vorliegen. Diese Tatsache ist dadurch zu erklären, dass Niederschlagswasser aufgrund der bereits aufgetragenen Oberflächenabdichtung nicht mehr in den Deponiekörper eintritt und somit eine Austrocknung der betroffenen Grenzflächen stattfindet. In diesem Kontext wird zudem abgeleitet, dass ein enger Zusammenhang der Wassergehalte dieser beiden Fraktionen besteht, wobei die Grobfraction durchschnittlich 4 Gew.-% geringere Wasseranteile aufweist.

Insgesamt zeigt sich, dass der mittlere Wassergehalt der Fraktion $< 35 \text{ mm}$ ca. 43 Gew.-% der FM ausmacht. Für die Grobfraction liegt er mit ca. 35 Gew.-% der FM vergleichsweise niedrig. Mit Ausnahme einzelner Hotspots, die sich im Rahmen der räumlichen Auswertung gezeigt haben, entsprechen die vorgefundenen Wassergehalte dabei den Angaben der Literatur.

Die teilweise hohen Wassergehalte einzelner Stoffgruppen müssen im Rahmen des Klassier- und Sortierprozesses als problematisch angesehen werden. Auch eine energetische Verwertung, die für

ausgewählte Stofffraktionen in Betracht kommt, ist teilweise ohne wassergehaltsreduzierende Maßnahmen nur bedingt möglich.

Der durchschnittliche Glühverlust des Deponieguts liegt bei ca. 41 Gew.-% TM. Der vergleichsweise hohe Glühverlust der Feinfraktion lässt vermuten, dass in dieser Fraktion noch ein hohes Potenzial an leicht abbaubaren, organischen Verbindungen vorhanden ist.

Wie bereits im Fall der Wassergehalte ergeben sich auch für die Glühverluste keine signifikanten Abhängigkeiten zur Untersuchungstiefe, jedoch besteht auch hier ein deutlicher Zusammenhang zwischen den Gehalten der Grob- und Feinfraktion.

Die untersuchten stoffspezifischen Glühverluste beschreiben in Abhängigkeit der physikalisch-chemischen Stoffeigenschaften typische Werte, die mit ähnlichen Untersuchungen vergleichbar sind.

Bei einem Rückbau der Kreismülldeponie Hechingen ist im Rahmen der Deponiegutklassierung mit einem mittleren Anteil der Fraktion < 35 mm von ca. 65 Gew.-% der FM zu rechnen. Entsprechend liegt die Fraktion > 35 mm im Wertebereich von ca. 35 Gew.-% der FM. Diese Ergebnisse decken sich mit Untersuchungen von EHRIG & BRINKMANN [1998], die für westdeutsche Deponien einen mittleren Anteil der Fraktion < 35 mm von ca. 60 Gew.-% der FM aufweisen.

Tendenziell kann in diesem Zusammenhang festgehalten werden, dass mit zunehmendem Alter des Deponieguts bzw. in tieferen Deponiebereichen der Feinanteil abnimmt und im Gegenzug der Anteil der Grobfraktion ansteigt. Ursächlich hierfür können Auswaschungsprozesse über das Deponiesickerwasser und ablagerungsspezifische Gegebenheiten sein. Räumlich betrachtet lassen sich diese Zusammenhänge ebenfalls erkennen. So sind ältere Deponiebereiche im Westen und Südwesten der Deponiefläche mit höheren Gehalten der Fraktion > 35 mm zu benennen.

Die aufgestellten Ablagerungsmengen beschreiben vorerst nur die auf die Kreismülldeponie Hechingen verbrachte Abfallmenge. Zur Abschätzung des aktuellen und zukünftigen Potenzials ist es jedoch notwendig, Prozesse des organischen Abbaus zu integrieren. Hierbei hat sich gezeigt, dass zum aktuellen Zeitpunkt sowie unter den definierten Randbedingungen etwa 201.000 bis 289.000 Mg FM der abgelagerten organischen Substanz abgebaut sind. In Abhängigkeit des betrachteten Szenarios kann sich diese Menge bis zum Jahr 2050 auf 241.000 bis 363.000 Mg FM steigern.

Die Analyse des theoretischen Rohstoffpotenzials, die die abfallartenspezifische Zusammensetzung in Relation zur Ablagerungsmenge setzt, zeigt auf, dass etwa 57.000 Mg der TM des Deponiekörpers Metalle darstellen. Weitere 452.000 Mg TM sind der heizwertreichen Fraktion zuzuschreiben. Die dominierende Stofffraktion sind nach Ergebnissen der theoretischen Abschätzung Mineralstoffe, die im Mittel zu ca. 397.000 Mg TM anfallen dürften.

In Bezug auf die Variation dieser berechneten Mittelwerte hat sich ergeben, dass Änderungen der Abfallzusammensetzung deutlich stärker auf das Ergebnis der Potenzialanalyse wirken als Änderungen der Ablagerungsmenge. Hierin spiegelt sich die hohe Variabilität der untersuchten Abfallzusammensetzungen wider, die im Fall der Ablagerungsmengen deutlich geringer ausfällt.

Im Rahmen der realen Potenzialermittlung konnten insgesamt zwei Bohrstaffeln realisiert werden. Aufgrund unterschiedlicher Bohrdurchmesser stellte sich die Frage, ob die gewonnenen Ergebnisse mit methodischen Fehlern behaftet sind. In diesem Kontext zeigen die Ergebnisgegenüberstellungen der ersten und zweiten Bohrstaffel nur geringfügige Abweichungen zueinander, die auf die Heterogenität des Deponiekörpers zurückzuführen sind.

Wie für das theoretische Ressourcenpotenzial gezeigt, hat sich die Zusammensetzung unterschiedlicher Abfallarten im Laufe der Zeit verändert. Es stellt sich nun die Frage, ob sich diese Tatsache auch im Deponiekörper widerspiegelt.

Hierbei haben sich keine eindeutigen Zusammenhänge ergeben. Tendenziell zeigt sich aber, dass Fe-Metalle - unabhängig vom Ablagerungsjahr der Abfälle - im Mittel ein einheitliches Niveau von ca. 2 Gew.-% FM der Gesamtuntersuchungsmasse besitzen. NE-Metalle beschreiben eine leicht steigende Tendenz, die durch ändernde Konsummuster zu erklären ist. PPK, die ohnehin ausschließlich in sehr geringen Mengen vorgefunden wurden, verzeichnen hingegen einen anteilmäßigen Rückgang im Verlauf der Ablagerungsphase. Gleiches gilt für die Fraktionen Glas, Kunststoffe, Holz, Verpackungen, kompl. Produkte und Schadstoffe, wobei in allen Fällen die Einführung getrennter Sammelsysteme als ursächlich angesehen werden kann.

In Hinblick auf einen ressourcenorientierten Rückbau weist die räumliche Potenzialanalyse der in-situ Sortierung den nordwestlichen und mittleren Deponiebereich als vorteilhaft aus. Informationen zum nördlichen Altbereich sind aufgrund der Lage der Bohrlöcher und daraus resultierender Interpolationsmöglichkeiten nicht vorhanden. Es kann aber auch hier ein vergleichsweise hohes Wertstoffpotenzial angenommen werden.

Die Nachsortierung der Fraktion < 35 mm zeigt, dass auch in dieser Fraktion noch Rohstoffpotenziale vorhanden sind, die es zu nutzen gilt. Hierbei treten Fe-Metalle, Glas, Kunststoffe, Mineralstoffe und Sortierreste in den Vordergrund der Betrachtung.

Variationsanalysen zum realen Ressourcenpotenzial beschreiben, dass sich - wie bereits im Fall des theoretischen Ressourcenpotenzials - Variationen der Deponiegutzusammensetzung deutlich stärker auf die reale Potenzialanalyse auswirken als die Variation der Abfallablagerung. Ein direkter Zusammenhang der Variabilität ist daher zu vermuten. Hieraus ergibt sich entsprechend die Vermutung eines funktionalen Zusammenhangs des theoretischen und realen Ressourcenpotenzials.

Diese Tatsache bestätigt sich beim direkten Vergleich beider Potenziale, bei dem sehr gute Übereinstimmungen für die Stofffraktionen Fe-Metalle, NE-Metalle, Glas und Schlämme vorhanden sind. Die dennoch bei einigen Stofffraktionen auftretenden großen Variationen beider Modellansätze sollten in weiteren Untersuchungen geklärt werden. Hierbei wären sowohl Fehleinschätzung auf realer als auch auf theoretischer Seite zu lokalisieren und zu bewerten.

In Hinblick auf Verwertungsoptionen der Feinfraktion sowie mineralischer Bestandteile ist festzuhalten, dass die je nach Verwertungsoption geforderten Grenzwerte keine unüberwindbare Hürde darstellen.

Für die heizwertreiche Fraktion wäre trotz hoher Wassergehalte sogar eine energetische Verwertung ohne Vorbehandlung denkbar. Der mittlere Heizwert dieser Fraktion kann mit $17.300 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ angenommen werden, woraus ein Gesamtheizwert der Kreismülldeponie Hechingen von ca. 9,2 bis 10,8 Mio. GJ resultiert. Zur energetischen Bewertung müssen jedoch weitere Abschläge in Form des

KEA sowie spezifische Wirkungsgrade unterschiedlicher Kraftwerke berücksichtigt werden. Hierbei ergibt sich ein mittleres Energiepotenzial von 6 – 7 Mio. GJ.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Kreismülldeponie Hechingen ein hohes Potenzial an Metallen und heizwertreichen Materialien bei gleichzeitig geringem Schadstoffgehalt besitzt. Zudem können diese räumlich differenziert werden.

Die abschließende ganzheitliche Bewertung der Effizienz des Rückbaus der Kreismülldeponie Hechingen rückt folgende Faktoren nebeneinander:

- Anfallende Rückbau- und Aufbereitungskosten
- Erlöse der Rohstoffvermarktung
- Entfallende Nachsorge- und Folgekosten
- CO₂-Einsparpotenzial.

Hierbei wird neben einer aktuellen Betrachtung ebenso die zeitliche Entwicklung näher charakterisiert. Es zeigt sich, dass je nach Randbedingungen bereits heute ein gewinnbringender Rückbau der Kreismülldeponie Hechingen stattfinden könnte. Als realistischste Abschätzung kann die mittlere Betrachtung angesehen werden. Der kostenneutrale Rückbau der Kreismülldeponie Hechingen wäre hiernach im Zeitfester 2021 bis 2048 realisierbar.

Mittel- und langfristig gilt es daher, die Entwicklungen auf den Rohstoff- und Energiemärkten sowie die Kostenpunkte der Deponiegutaufbereitung und Reststoffentsorgung weiterhin zu beobachten und angenommene Modellparameter entsprechend zu aktualisieren.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Ergebnisse des Forschungsprojektes zeigen, dass Deponien Depots darstellen. In den meisten Fällen ist jedoch ihr tatsächlicher Wert noch unbekannt. Wie am Beispiel der Kreismülldeponie gezeigt, bietet das theoretische Ressourcenpotenzial eine kostengünstige Möglichkeit, Vorabschätzung des realen Rohstoffwerts zu modellieren. Weitere Untersuchungen sollten zeigen, welche wesentlichen Stellschrauben die Anpassung zwischen Realität und Theorie noch verbessern können.

Neben den abgelagerten Rohstoffmengen ist die Wirtschaftlichkeit des Deponierückbaus weitestgehend durch Absatzmöglichkeiten bestimmt. So können sich bereits kleinere Änderungen der Entsorgungskosten und Sekundärrohstoffpreise positiv auf die Gesamtbilanz auswirken und einen Rückbau früher als erwartet nutzeneffizient darstellen.

Wissenschaftliche Ergebnisse zur praxisnahen und großtechnischen Umsetzung eines Deponierückbaus liegen derzeit nur vereinzelt vor. Folgende Aspekte sollten aus aktueller Sicht geklärt werden:

- Erfassung der qualitativen und quantitativen Materialströme und Vergleich zu vorliegenden manuellen Untersuchungen (Stoffstromanalysen, Input-Output Analysen)
- Erkundung und Auswirkungsanalyse differenzierter Aufbereitungstiefen und -techniken

- Identifikation und Bewertung spezifischer und technisch möglicher Rückgewinnungsquoten mit besonderem Augenmerk auf Wertstoffe wie Aluminium, Kupfer, andere wertvolle Technologiemetalle, qualitativ hochwertige Sekundärbrennstoffe sowie Abfallstoffe
- Ökologische und ökonomische Berücksichtigung und Charakterisierung logistischer Möglichkeiten bzw. Grenzen
- Erarbeitung von potenziellen technischen Basisdaten zur Ableitung ökologischer und ökonomischer Planungsdaten im Rahmen der großmaßstäbigen Aufbereitung von Deponierückbaustoffen

Im Abbau und der Aufdeckung dieser Defizite sollte das zukünftige Interesse liegen.

8 LITERATUR

A

ALLIANZ GLOBAL INVESTORS | 2011:

Knappe Ressourcen. Abgerufen am 04.08.2011 unter
www.allianzglobalinvestors.de/web/download?file=Analysen-und-Trends-Knappe-Ressourcen.pdf

ALWAST, H. & BIRNSTENGEL, B. | 2010:

Verbrennungs- und Ersatzbaustoffmarkt in Deutschland und Europa. Müllhandbuch. 2. Auflage. Band 1 Nr. 0171. MuA Lfg. 2/10. Erich Schmidt Verlag. Berlin
ISBN: 3503097783

ARGUS | 1995:

Abfalluntersuchung im Landkreis Böblingen, Berlin

ARGUS | 1999:

Hausmüllanalyse für eine Großstadt in Nordrhein-Westfalen, Berlin

AVANTIME CONSULTING GMBH | 2011:

Das Portal zum Emissionshandel und Klimaschutz. Abgerufen am 20.11.2011 unter
www.co2-handel.de

AWIPLAN | 1994:

Sortieranalysen hausmüllähnlicher Gewerbeabfälle im Landkreis Ludwigsburg

B

BAFU - BUNDESAMT FÜR UMWELT | 2006:

Die Deponie als Rohstofflager. Bern. Abgerufen am 31.08.2009 unter
www.bafu.admin.ch/dokumentation/fokus/01218/01220/index.html?lang=de

BANK, W. | 2011:

Prospects for the Global Economy - China, global metal demand, and super-cycle hypothesis. Global Economic Prospects.

BARDT, H. | 2005:

Rohstoffreichtum – Fluch oder Segen?. IW-Trends 32. Vierteljahresschrift zur empirischen Wirtschaftsforschung aus dem Institut der deutschen Wirtschaft Köln. Heft 1. S. 33–43

BARDT, H. | 2006:

Die gesamtwirtschaftliche Bedeutung von Sekundärrohstoffen. IW-Trends 33. Vierteljahresschrift zur empirischen Wirtschaftsforschung aus dem Institut der deutschen Wirtschaft Köln. Heft 3. Vorabdruck

BARTL, U. | 2005:

Deponieabschluss: Vom Deponiebetrieb zur Nachsorge: Aufgabe, Wege und Lösungen. In: Potsdam: DAS-IB GmbH.

BAUER, C., LEBUHN, M. & GRONAUER, A. | 2009:

Mikrobiologische Prozesse in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Abgerufen am 23.01.2010 unter www.lfl.bayern.de/publikationen/daten/informationen/p_27456.pdf

BAUR, F. ET AL. | 1996:

Fortschreibung des Feldversuchs Saarland, Witzenhausen: ARGE Witzenhausen-Institut/UGB.

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT | 2011A:

Definition Siedlungs-, Gewerbe-, und Produktionsabfälle. Abgerufen am 01.04.2011 unter www.lfu.bayern.de/abfall/definition_siedlungs_produktionsabfaelle/index.htm

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT | 2011B:

InfoBlatt Abfallwirtschaft - Sperrmüll. Augsburg: Abfallinformationsstelle des LfU - Abfallratgeber Bayern.

BAYRISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ | 1984:

Abfallmenge und Zusammensetzung in der Stadt Augsburg sowie den Landkreisen Augsburgs und Aichach. Friedberg

BECKMANN, M. & NCUBE, S. | 2007:

Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen hinsichtlich brennstofftechnischer Eigenschaften. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Sekundärrohstoffverwertung II – stofflich – energetisch. Witzenhausen, 2007, S. 232–263. ISBN 3-928673-50-5

BERLIN | 2000:

Siedlungsabfälle-Geschäftsmüll, Zusammensetzung des Geschäftsmülls 1997. Abgerufen am 20.11.2007 unter www.sensut.berlin.de/sensut/umw.../abfall/siedlung_geschaeftsmuell.shtml

BGR - BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE | 1999:

Reserven, Ressourcen und Lebensdauer von mineralischen Rohstoffen und Energierohstoffen, Hannover: Veröffentlichung der BGR.

BIDLINGMAIER, W. & KRANERT, M. | 2004:

Geschäftsmüll - Abfallwirtschaftliche Bedeutung, Menge, Zusammensetzung und Einflussgrößen. Manuskripte zur Abfallwirtschaft Band 6.

BILITEWSKI, B., HÄRDLE, G. W. & MAREK, K. A. | 2000:

Abfallwirtschaft - Handbuch für Praxis und Lehre; 3.neubearbeitete Auflage. Berlin & Dresden: Springer-Verlag Berlin.
ISBN-10: 3540642765

BISCHOFBERGER, W., DICHTL, N., ROSENWINKEL, K.-H. & SEYFRIED, C. F. | 2005:

Anaerobtechnik - 2. überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

BMU | 1988:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Was Sie schon immer über Abfall und Umwelt wissen wollten. Berlin: BMU.

BOGON, H. | 2005:

Deponiegasprognose: Worauf kommt es an?, Neustadt am Rbge.: Praxistagung Deponien - www.wasteconsult.de.

BOIE, W. | 1957:

Vom Brennstoff zum Rauchgas. Feuerungstechnisches Rechnen mit Brennstoffkenngrößen und seine Vereinfachung mit Mitteln der Statistik. B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig

BÖLTE, S. & GEIPING, J. | 2011:

Siedlungsabfalldeponien - Nachsorge oder Rückbau. In: Deponietage 2011 - Betrieb, Stilllegung und Nachsorge von Deponien. Hennef.

BONNET, M. & VIERTEL, J. L. | 2007:

Herstellung und Verwertung von Ersatzbrennstoffen unter besonderer Berücksichtigung des Werkstoffes PVC. Institut für Werkstoffanwendungen. Fachhochschule Köln.

BOTHMANN, P. | 2005:

Profilierung von Deponien durch Abfallumlagerung - Probleme und Möglichkeiten. In: Zeitgemäße Deponietechnik 2005. Stuttgart: Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft Band 84, S. 43-52.

BOTHMANN, P. ET AL. | 2002:

Umlagerung und Rückbau von deponierten Abfällen, Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. - ATV-DVWK/VKS Fachausschuss 3.6 "Deponien". ISBN-10: 3936514003

BRAMMER, F. ET AL. | 1997:

Rückbau von Siedlungsabfalldeponien. Stuttgart: Teubner-Verlag. ISBN-10: 3815435315

BUCHHOLZ, P. | 2008:

Indikatoren zur Früherkennung von Preisentwicklungen auf Rohstoffmärkten. In: Bio- und Sekundärstoffverwertung III. Witzenhausen: Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, S. 155-166.

BURKHARDT, G. & EGLOFFSTEIN, T. | 1996:

Invest- und Folgekostenermittlung von Oberflächenabdichtungen und Rekultivierungsmaßnahmen. VDI-Bildungswerk - Kostenblock Deponienachsorge.

BURKHARDT, G. & EGLOFFSTEIN, T. | 2005:

Ermittlung der Nachsorge- und Folgekosten von Deponien auf der Grundlage der neuen Verordnungen. Praxistagung Deponie 2005.

C

CARDIFF UNIVERSITY | 2004:

Landfill Mining. Abgerufen am 31.08.2009 unter www.wasteresearch.co.uk/Sian/mining/mining.htm

CHRIST, M., FELL, A., FRIEDRICH, S. & RETTENBERGER, G. | 2011:

Untersuchungen zum Wertstoffpotenzial in Abfällen von rückgebauten Hausmülldeponien. In: Müll und Abfall. Band 10/11. S. 466–469. Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG

COSSU, R., MOTZO, G. M. & LAUDADIO, M. | 1995:

Preliminary study for a landfill mining. Proceeding of Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, Band 3, S. 841-850.

D

DEPV | 2009:

Verordnung über Deponien und Langzeitlager. Zuletzt geändert durch Art. 1 V v. 17.10.2011 | 2066

DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION | 1999:

Richtlinie 1999/31/EG Des Rates über Abfalldeponien. In: s.l.:Arbeitsblatt der Europäischen Gemeinschaft.

DERNBACH, H. | 1982:

Versuche zur Abschätzung des Gaspotentials einer Deponie anhand von Müllproben. Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen der Technischen Universität Braunschweig, Band Heft 33, S. 447 - 470 .

DIE BUNDESREGIERUNG | 2007:

Elemente einer Rohstoffstrategie. Berlin. Abgerufen am 24.02.2011 unter www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF

DIECKHOFF, G. & PRACK, H. R. | 1995:

Sanierung durch Umlagerung alter Deponiebereiche - Technische und rechtliche Konzeption. In: Mit alten Deponien leben oder ständige Anpassung an den Stand der Technik?. Berlin: 43. Umwelttechnologieforum , S. 145-162.

DIECKHOFF, G. & PRACK, R. | 1994:

Sanierung durch Umlagerung - ökologische, ökonomische und planungsrechtliche Konzepte bei der Altlastensanierung. Müll und Abfall, Band 6, S. 345-352.

DIN 19529 | 2009:

Elution von Feststoffen - Schüttelverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen Stoffen mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN 19684-3 | 2000:

Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau - Chemische Laboruntersuchungen - Teil 3: Bestimmung des Glühverlusts und des Glührückstands. Berlin: Beuth.

DIN 38414-2 | 1985:

Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Schlamm und Sedimente (Gruppe S) - Bestimmung des Wassergehaltes und des Trockenrückstandes bzw. der Trockensubstanz (S 2)

DIN 51900 | 2004:

Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe - Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes, Teile 1 - 3. Beuth Verlag GmbH, Berlin

DIN 5499 | 1972:

Brennwert und Heizwert; Begriffe. Beuth Verlag GmbH, Berlin

DIN EN 12457-4 | 2003:

Charakterisierung von Abfällen - Auslaugung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN EN 13657 | 2003:

Charakterisierung von Abfällen - Aufschluß zur anschließenden Bestimmung des in Königswasser löslichen Anteils an Elementen in Abfällen. Berlin: Beuth Verlag GmbH .

DOHMANN, M. | 1997:

BMF-Verbundvorhaben Deponiekörper - Teilvorhaben 3: Emissionsverhalten umweltrelevanter Schadstoffe in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Abfalls und der Standzeit der Deponie. Institut für Siedlungswasserwirtschaft der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

DÖPPENSCHMITT, A. | 1993:

Abfall und seine Bewältigung in privaten Haushalten - Möglichkeiten eines gruppenspezifischen Ansatzes dargestellt am Beispiel Coburg. Würzburg: Dissertation zur Erlangung des naturwissenschaftlichen Doktorgrades der Bayrischen Julius-Maximilians-Universität.

DSW | 2011:

Deutsche Stiftung Weltbevölkerung, Weltbevölkerung wächst bis 2050 stärker als angenommen auf 9,3 Milliarden. DSW: „Menschen in Entwicklungsländern brauchen mehr Aufklärung und Verhütungsmittel“. Neueste UN-Projektionen – erstmals bis 2100:

DUARTE, A. C. & ANDERSON, G. K. | 1983:

Modellrechnungen für die Hemmung der anaeroben Abbauprozesse. IAWPR – Konferenz. Heft 2.

E

ECB | 2004:

Europäische Zentralbank. Oil Prices and the Euro Area Economy. Monthly Bulletin, Frankfurt November 2004, S. 51f; abgerufen am 29.07.10 unter <http://www.ecb.europa.eu/pub/pdf/mobu/mb200411en.pdf?0cc3fbdd9d27b9738f346bdbf8bbafe7>

ECOENERGY GMBH | 2006:

Ersatzbrennstoffe für Industrieanlagen. VDI-Seminarunterlagen vom 05.12.2006. Berlin

EHRIG, H.-J. & BRINKMANN, U. | 1998:

Verbundvorhaben Deponiekörper - Zusammenfassender Abschlussbericht zum Arbeitsgebiet

Siedlungsabfälle (Teilvorhaben 3-7), Abfallwirtschaft und Altlastensanierung im Umweltbundesamt, Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie – Berlin.

EITNER, R. | 2010A:

Rückstellungsberechnungen für Abfalldeponien - Stand der Erkenntnisse und aktuelle Entwicklungen. In: Deponietage 2010 - Betrieb, Stilllegung und Nachsorge von Deponien. Minden: Gemeinschaftstagung von DWA, ANS und VKS im VKU in Kooperation mit ASA CREED INWESD.

EITNER, R. | 2010B:

Kalkulation von Deponierückstellungen. Gießen: 7. Hessischer Deponietag - Fachtagung.

EITNER, R. | 2010C:

Kosten der Stilllegung und Nachsorge, Rückstellungskalkulation. In: Deponietechnik 2010. Hamburg: Verlag Abfall aktuell.

ENERGIEAGENTUR.NRW | 2010:

Effiziente Energienutzung in der Recyclingindustrie - Nützliche Informationen und Praxisbeispiele für Unternehmen. Wuppertal

ENGELE, K. | 1990:

Universität Oldenburg. Verbundprojekt eL3 der Universität Oldenburg und des FIM-NeuesLernen - Universität Erlangen-Nürnberg - gefördert durch das BMBF (FKZ: 08NM086). Abgerufen am 14.07.2011 unter http://cg-hci.informatik.uni-oldenburg.de/~el3/biologie/el3_ol_biologie_simulation-animation_v03.1/html/flow1/page1.html#Ref_ID18

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY | 1997:

Landfill Reclamation, Washington: Solid Waste and Emergency Response.

ERICSSON, M. 2011:

Metal prices back on top of 2011! World of Metallurgy - Erzmetall. S. 57-58..

ERSATZBAUSTOFFV-E | 2011:

Arbeitsentwurf der Ersatzbaustoffverordnung. Stand 06.01.2011. Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen und das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzbaustoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material. Bonn: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Bonn

EUWID | 2011:

Recycling und Entsorgung - Stahlschrottpreise Deutschland. Abgerufen am 10 10 2011 unter www.euwid-recycling.de

F

FARQUHAR, G. J. & ROVERS, F. A. | 1973:

Gas production during refuse decomposition. *Water, Air and Soil Pollution*, Band 2, S. 483-495.

FAULSTICH, M., FRANKE, M., LÖH, I. & MOCKER, M. | 2010:

Urban Mining – Wertstoffgewinnung aus Abfalldeponien. ATZ Entwicklungszentrum. Bayrische Abfall- und Deponietage 2010. KUMAS und bifa. Augsburg

FINCK, M. | 1999:

Rückbau versus Sicherung - Entwicklung eines Entscheidungsmodells am Beispiel der Deponie Wernsdorf. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky.

FISCHER-KOWALSKI, M. | 2009:

Plenary Presentations of the World Resources Forum 2009: A hundred years of resource use of the world economy. Dynamics, drivers, impacts. Abgerufen am 11.05.2011 unter <http://www.worldresourcesforum.org/archive/wrf-2009/plenary-presentations>

FOLLATH, E. & JUNG, A. | 2008:

Der neue kalte Krieg- Kampf um die Rohstoffe. 1. Auflage Taschenbuchausgabe. Spiegel Buch Verlag. Hamburg 2008

FRANZIUS, V. | 1982:

Gashaushalt von Deponien - Einführung in die Thematik. Veröffentlichungen des Institutes für Stadtbauwesen der Technischen Universität Braunschweig, Heft 33. S. 301-306.

FRICKE, K. ET AL. | 2002:

Verfahren und Aggregate zur mechanischen Aufbereitung. In: Mechanische und biologische Verfahren der Abfallbehandlung. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V .

FRICKE, K. | 2009:

Urban Mining – nur ein Modebegriff. *Müll und Abfall*. 10/09. S. 489

FRIEDMANN, H. & ZOLLNER, F. | 1995:

Behandlung und Verwertung von Altmüll aus dem Deponierückbau. *Abfallwirtschaftsjournal*, 7 Nr. 1/2, S. 76-81.

FRONDEL, M. ET AL. | 2005:

Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen - Forschungsprojekt Nr. 09/05 des Bundesministeriums für Wirtschaft (BMWi), Essen, Karlsruhe, Hannover: Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI Essen), Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).

FUCHS, J. | 1987:

Planung und Durchführung von Abfallanalysen für das Land Berlin (West) 1983, in Studienreihe Abfall Now, Band 3, Erhebung über die Zusammensetzung von Gewerbeabfällen, Stuttgart: Verlag Abfall Now.

G**GÄTH, S. | 2011:**

Abfallwirtschaft – Die Schlüsselwirtschaft für knapper werdende Ressourcen. Müll und Abfall. Band 02/2011. S. 49.

GÄTH, S. & NISPEL, J. | 2011:

Ressourcenpotenzial von ausgewählten Hausmülldeponien in Deutschland. Müll und Abfall, Band 02/2011, S. 61-67.

GERHART, C., MATVIENKO, O., DÜCK, J. & NEEBE, T. | 2011:

Numerische Berechnungen der Dichtstromtrennung im Hydrozyklon. Abgerufen am 10.03.2011 unter www.uvt.uni-erlangen.de/deutsch/papers/J1998/Hydrozyklon_LUR_Erlangen.pdf

GERINGSWALD, K. | 2001:

Untersuchung des Emissionsverhaltens von aktiv betriebenen und stillgelegten Siedlungsabfalldeponien in Abhängigkeit von Umgebungseinflüssen und Abdeckvarianten. Niederdorf: Hochschule Mittweida - University of applied sciences.

GEWABFV | 2003:

Gewerbeabfallverordnung - Verordnung über die Entsorgung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen.

GÖSCHL, R. | 1994:

Deponierückbau zur Gewinnung von Deponievolumen - Konzeption und Planung einer Pilotanlage auf der Deponie Burghof. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 70, S. 11-24.

GÖSCHL, R. | 1995:

Rückbau der Deponie Burghof im Landkreis Ludwigsburg. Abfallwirtschafts-Journal, Band 7, S. 92-98.

GROß, M. | 1998:

Erfahrungen aus dem ersten Bauabschnitt des Rückbaus der Deponie Rennerod, Westerwaldkreis, Lochem: Diplomarbeit an der Fachhochschule Bingen - Fachbereich Umweltschutz.

H

HAARSTRICK, A. & HEMPEL, D. C. | 2003:

Analyse der biologischen und chemischen Reaktionsprozesse in Deponien. Band Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung.

HABICH, U. | 2007:

Automatische Sortiersysteme für Anwendungen in der Abfallsortierung. In: Internationale Tagung MBA 2007 - Mechanisch-biologische Abfallbehandlung und automatische Abfallsortierung. Göttingen: Cuvillier Verlag.

HAM, R. K. | 1982:

Einflußfaktoren auf die Gasproduktionsrate von Proben aus Mülldeponien. Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen der Technischen Universität Braunschweig, Band Heft 33, S. 419 - 446 .

HANNOVER | 1996:

Abfallwirtschaftsprogramm 1996-2000. Abfallwirtschaftsbetrieb. Hannover

HARMS-KREKELER, C. | 1996:

Abfallrechtliche Aspekte des Deponierückbaus. In: Deponietechnik 1996 - Untergrund Abdichtung Deponieverhalten Deponierückbau Terminologie - Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis Bd. 85. Berlin: Erich Schmidt Verlag, S. 211-226.

HERBOLD MECKESHEIM GMBH | 2006:

Infoblatt 47 - Hydrozyklone. Abgerufen am 21.05.2011 unter www.schneidmuehlen-herbold.de/info/info47-DE-Hydrozyklone.pdf

HFVA | 2009:

Hessischer Forschungsverbund für Abfall, Umwelt und Ressourcenschutz e.V. Bewertung von Rohstoffpotenzialen der hessischen Deponien für Siedlungsabfall, Witzenhausen/ Kassel: Universität Kassel.

HOGLAND, W., MARQUES, M. & NIMMERMARK, S. | 2004:

Landfill mining and waste characterization: a strategy for remediation of contaminated areas. Journal of Material Cycles and Waste Management, Band 6, S. 119-124.

HÖLZLE, I. | 2010:

Vom Deponierückbau bis zum landfill mining - eine Synthese internationaler Untersuchungen. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Band 62 | Nr.7/8, S. 155-161.

HÖLZLE, I. | 2011:

Energieeffizienz von Deponierückbauprojekten - Energy efficiency of landfill mining. Müll und Abfall, Band 10/10, S. 488-492.

HÖSEL, G. | 1974:

Möglichkeiten und Grenzen des Recycling von Abfällen - Bedeutung und gegenwärtiger Stand des Recycling. Müll und Abfall. Nr. 6. S. 97-98.

HTP INGENIEURGESELLSCHAFT PARTG | 2004:

Prinzipien und Anwendungsmöglichkeiten von Sensorsystemen in der Abfallaufbereitung. Abgerufen am 12.04.2011 unter www.htp.eu/scripte/34_HTP-Langen_Dezember-2004.pdf

HÜTLER, K. & WISKEMANN, B. | 1995:

Rückbaufähigkeit von Deponien am Beispiel der Zentraldeponie Düsseldorf Hubbelrath. Abfallwirtschafts Journal, Band 7, S. 82-91.

I**IEA | 2011:**

World Energy Outlook 2011 Factsheet, International Energy Agency.

IfW | 2009:

Pressemitteilung des IfW Institut für Wirtschaft Kiel: Weltwirtschaft im Abwärtsstrudel. Abgerufen am 26.04.2010 unter <http://www.ifw-kiel.de/medien/pressemitteilungen/2009/pm12-03-09a>

INPEOS | 2010:

Institut für Partizipation und Chancengerechtigkeit. Demographischer Wandel. Abgerufen am 25.04.2010 unter http://www.inpeos.de/Demographischer_Wandel.html

J**JANKE, H. D. | 2002:**

Umweltbiotechnik. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.

JINHEE PARK, M. A. | 2004:

Von der Müllkippe zur Abfallwirtschaft - Entwicklung der Hausmüllentsorgung in Berlin (West) von 1945 bis 1990. Berlin: Dissertationsarbeit an der Fakultät I Geisteswissenschaften der Technischen Universität Berlin.

K

KALTSCHMITT, M. & HARTMANN, H. | 2009:

Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren. Heidelberg: 2. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag.

KAPP, H. | 1984:

Schlammfäulung mit hohem Feststoffgehalt. Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 86.

KARNOWSKY, F. | 1978:

Stand der Abfallwirtschaft. Forum Städte-Hygiene 4. S. 180-183.

KOCH, E. & HARMS-KREKELER, C. | 1997:

Juristische Untersuchungen. In: Rückbau von Siedlungsabfalldeponien - Teubner-Reihe Umwelt. Stuttgart, Leipzig: Teubner-Verlag, S. 140-193.

KOHAUPT, U. | 2007:

Metallsortierung in der Abfallwirtschaft - Qualitätssteigerung und ökonomisches Standbein. In: Internationale Tagung MBA 2007 - Mechanisch-biologische Abfallbehandlung und automatische Abfallsortierung. Göttingen: Cuvillier Verlag.

KORN, A. | 2011:

Mündliche Aussage zur Effizienzsteigerung beim Recyclingprozess – Erfahrungsbericht aus der Praxis. Recyclingunternehmen Korn. Albstadt.

KOST, T. | 2001:

Brennstofftechnische Charakterisierung von Haushaltsabfällen. Dissertation Thesis, Technische Universität Dresden, Dresden.

KÖSTERING, S. | 2007:

Vergraben oder Verwerten - Zur Geschichte des Mülls in der Industriegesellschaft. In G. Hösel, B. Bilitewski, W. Schenkel, & H. Schnurer, Müll-Handbuch. Band 1/0117.

KRANERT, M. ET AL. | 1995:

Gewerbeabfallanalyse der Stadt Braunschweig, Forschungsbericht für die Stadt Braunschweig. Fachhochschule Braunschweig Wolfenbüttel.

KRANERT, M. & CORD-LANDWEHR, K. | 2010:

Einführung in die Abfallwirtschaft. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag | Springer Fachmedien GmbH.

ISBN-10: 3835100602

KREINDL, G. | 2010:

Herausforderungen der NIR-Sortierung von gemischten Abfällen aus Industrie und Gewerbe. Depotech 2010 | Abfallwirtschaft Abfalltechnik Deponietechnik und Altlasten, S. 249-256.

KRUG, S. | 2008:

Ressourcenpotenzial von Deponien - Gehalt an Stahlwerksrückständen der Deponie Eulingsberg, Gießen: Masterarbeit an der Jusus-Liebig-Universität, Professur für Abfall- und Ressourcenmanagement.

KRUG, S. | 2009:

Genehmigungsverfahren des Deponierückbaus aus behördlicher Sicht - Mündliche Aussage Bauassessor. Gießen.

KRÜMPELBECK, I. | 2000:

Untersuchungen zum langfristigen Verhalten von Siedlungsabfällen - Dissertation an der Gesamthochschule Wuppertal. Wuppertal.

KRUSE, G. | 1987:

Grundsatz- und Strategiestudie zur Fortschreibung der Abfallbewirtschaftung im Landkreis Segeberg, Teil III, Gewerbe- und Geschäftsmüllanalyse und Empfehlungen zur Altstofferfassung, im Auftrag des Wegezweckverbandes Segeberg. Studienreihe Abfall Now, Band 3, Erhebungen über die Zusammensetzung von Gewerbeabfällen, Stuttgart, S. 42-69.

Kurian, J., Esakku, S., Palanivelu, K. & Selvan, A. | 2003:

Studies on landfill mining at solid waste dumpsites in India. Proceedings Sardinia 03, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, S. 248.

KrW-/ABFG | 1996:

Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen. Zuletzt geändert durch Art. 5 G v. 6.10.2011 | 1986

L**LAGA PN 98 | 2004:**

Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/ Beseitigung von Abfällen. Mainz: Länderarbeitsgemeinschaft Abfall.

LANDRATSAMT ZOLLERNALBKREIS – ABFALLWIRTSCHAFT | 2009:

Zusammenstellung der gefassten und entsorgten Gasmengen, Balingen: Landratsamt Zollernalbkreis.

LEIKAM, K., HEYER, K.-U. & STEGMANN, R. | 1998:

Beschleunigung der In-Situ-Stabilisierung von Altdeponien oder Mumifizierung?. In: Geforderte Maßnahmen bei der Stilllegung von Altdeponien: Kostentreibende Willkür oder Notwendigkeit?. Berlin: Erich Schmidt Verlag.

LEMSER, B. & MATSCHKE, M. | 1993:

Grauzone "Geschäftsmüll" - Ergebnisse einer Untersuchung zum Abfallaufkommen und zur Entsorgung von Kleingewerbebetrieben. Müll und Abfall, S. 664-673.

LERCH, U., ROYL, M. & ZOBEL, R. | 2010:

Kommunale Altdeponie Marquartstein – Erfahrungen mit Rückbau und stofflicher Trennung. Augsburg, KUMAS - Kompetenzzentrum Umwelt e.V..

LFU | 1992:

Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Der Deponiegashaushalt in Altablagerungen - Vorgehensweise und Technik zu seiner Erkundung und Bewertung. Karlsruhe: Materialien zur Altlastenbearbeitung.

M

MATTHIES, K. | 2011:

Rohstoffpreise 2008. Hamburgisches WeltWirtschaftsinstitut (HWWI-2008). HWWI Policy Report Nr. 8. Hambur
ISSN: 1862-4944

MAUTHE INGENIEUR- UND ARCHITEKTURBÜRO | 2011:

Zusammenstellung der jährlichen Volumenermittlung auf der Kreismülldeponie Hechingen. Balingen

MAIER, D. | 1999:

Veränderung der Zusammensetzung des Hausmülls aus historischer Perspektive. Müllhandbuch digital (1703 - Menge und Zusammensetzung der festen Abfälle). S. 1-10.

MOCKER, M., FRANKE, M., STENZEL, F. & FAULSTICH, M. | 2009A:

Von der Abfallwirtschaft zur Ressourcenwirtschaft. Tagungsband der 11. Münsteraner Abfallwirtschaftstage. S. 27-33. Münster

MOCKER, M. ET AL. | 2009B:

Urban Mining – Rohstoffe der Zukunft. Müll und Abfall. Nr. 10/09. S. 492-501

MUDRACK, K. & KUNST, S. | 1985:

Biologie der Abwasserreinigung. Stuttgart, New York.: Gustav Fischer Verlag.

MÜLLER, U. ET AL. | 1994:

Bundesweite Gewerbeabfalluntersuchung - gekürzte Fassung -. Berlin: Umweltbundesamt.

N

NARANJO, N. F. M. | 2004:

Analyse und Modellierung anaerober Abbauprozesse in Deponien. Gemeinsame Naturwissenschaftliche Fakultät der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig: FIT-Verlag für Innovation und Technologietransfer - Paderborn.

NÖTSTALLER, R. & WAGNER, H. | 2009:

Überlegungen zum Rohstoffbedarf und zur Rohstoffpolitik. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatsheft, Nr. 12 Springer Verlag. Wien 2007

O

OECD | 2011:

OECD Environmental Outlook to 2030. Abgerufen am 24.08.2011 unter www.sourceoecd.org/environment/9789264040489

P

POLLER, T. | 1990:

Hausmüllbürtige LCKW/FCKW und deren Wirkung auf die Methangasbildung. Hamburger Berichte 2.

PRANTL, R., TESAR, M., HUBER-HUMMER, M. & FRITZ, I. | 2006A:

Stabilisierung organischer Substanz in Altablagerungen. In: Innovative in-situ Methoden zur Sicherung und Sanierung von Altablagerungen und Altstandorten. Wien: Facultas Verlag.

PRANTL, R., TESAR, M., HUBER-HUMMER, M., HEISS-ZIEGLER, C. | 2006B:

Technischer Leitfaden - In-situ Aerobisierung von Altablagerungen. Veröffentlichung des Instituts für Abfallwirtschaft. Universität für Bodenkultur. Wien.

R

RAKETE, M. | 2001:

Erfahrungen mit dem Rückbau und der Umlagerung im Rahmen des Deponieabschlusses. In: Abluftbehandlung bei MBA und Deponiebetrieb - Konsequenzen für die Praxis, 62. Informationsgespräch des ANS e.V.. Kaiserslautern: ORBIT e.V., S. 295-310.

REIMANN, D. O. & HÄMMERLI, H. | 1995:

Verbrennungstechnik für Abfälle in Theorie und Praxis. Schriftenreihe Umweltschutz, Bamberg

RETTENBERGER, G. | 1995:

Betriebsleiterhandbuch Deponiegas. Stuttgart: RUK Ingenieurgruppe.

RETTENBERGER, G. ET AL. | 1995:

Deponierückbau an der Deponie Burghof in Vaihingen/Enz-Horrheim - Erfahrungen aus dem Demonstrationsprojekt. Korrespondenz Abwasser, Band2.

RETTENBERGER, G. | 1996A:

Ist Deponierückbau sinnvoll?. In: Abwasser- und Abfallwirtschaft - Umweltschutz vor neuen Aufgaben, Abwassertechnische Vereinigung e. V., ATV-Schriftenreihe 4. Leipzig: Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V., S. 611-631.

RETTENBERGER, G. | 1996B:

Abschätzung von Deponiegasemissionen über den Gaspfad. Beiträge zur Abfallwirtschaft - Langzeitverhalten von Deponien, Band 4.

RETTENBERGER, G. | 1997:

Emissionsverhalten hochverdichteter Abfälle - Erfahrungen aus dem Rückbauprojekt Deponie "Burghof" im Verbundvorhaben Deponiekörper, Wuppertal: Abfallwirtschaft und Altlastensanierung im Umweltbundesamt Berlin, Bundesministerium für Bildung und Forschung.

RETTENBERGER, G. | 1998:

Rückbauen und Abgraben von Deponien und Altablagerungen, Stuttgart: Verlag Abfall aktuell GbR.

RETTENBERGER, G. | 2009:

Zukünftige Nutzung der Deponie als Ressourcenquelle. Tagungsband 11. Münsteraner Abfallwirtschaftstage. S. 101-109. Münster **und**
Zusammenfassung: Rohstoffgewinnung/ Umweltschutz/ Treibhausgasemissionen. Deponierückbau – Ein Modell für die Zukunft?. DGAW Fachveranstaltung im Rahmen der TerraTec – Leipziger Messe. Berlin

RETTENBERGER, G. | 2010A:

Urban Mining – alternative Ressourcenquelle. In: Fachkongress für urbanen Umweltschutz. Kongresszentrum SASE, Iserlohn

RETTENBERGER, G. | 2010B:

Deponierückbau: Technik, Wirtschaftlichkeit, Perspektiven. In: Deponietechnik 2010 | Dokumentation der 7. Hamburger Abfallwirtschaftstage. Hamburg: Verlag Abfall aktuell.

RETTENBERGER, G. | 2011:

Entscheidungskriterien für Nachsorgekonzepte. In: Zeitgemäße Deponietechnik 2011 Nachsorge und Nachnutzung. Stuttgart-Büsnau: Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft Universität Stuttgart, S. 25 - 35.

RETTENBERGER, G. & DOM, E. | 1987:

Gasförmige Emissionen in den deponienahen Luftraum. Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 24, S. 9-30.

RETTENBERGER, G. & MEZGER, H. | 1992:

Der Deponiegashaushalt in Altablagerungen - Leitfaden Deponiegas. In: Handbuch Altlasten. Karlsruhe: Landesamt für Umweltschutz Baden-Württemberg.

ROWELL, D. L. | 1994:

Bodenkunde - Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag.

RWI ESSEN, ISI & BGR | 2006:

Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen. Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI), Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Forschungsprojekt Nr. 09/05 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Endbericht

S**SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE | 1998:**

Richtlinie zur einheitlichen Abfallanalytik in Sachsen, Dresden

SALHOFER, S., GABRIEL, R., & RAUSCHER, B. | 1996:

Modellierung des regionalen Abfallaufkommens aus Betrieben am Beispiel Wiens - Projektphase I. Wien: MA 22 - Umweltschutz.

SAURE, T., HECKENKAMP, G. & OBERMEIER, T. | 1995:

Deponierückbau: mechanischbiologische Behandlung von Altabfällen. Entsorgungs Praxis, Heft 5/95.

SAVAGE, G. M., GOULEKE, C. G. & STEIN, E. L. | 1993:

Landfill mining: past and present. BioCycle, 34(5), S. 58-61.

SCHARF, W. | 1982:

Untersuchungen zur gemeinsamen Ablagerung von Müll und Klärschlamm im Labormaßstab. Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen der Technischen Universität Braunschweig, Band Heft 33, S. 83 - 98.

SCHNEIDER, J. | 2011:

Untersuchungen zum Biomassebildungspotenzial ausgewählter Mikroalgen unter verschiedenen Umweltbedingungen als Beitrag zum Energie- und Klimaschutz. Boden und Landschaft Band 58. Gießen.

ISBN: 3931789586

SCHROTT | 2011:

Schrott.de – entsorgen ohne Sorgen!. Abgerufen am 01.11.2011 unter <http://www.schrott.de/schrott/preise>

SCHULTE, B. | 2011:

Deponierückbau - Vorstellung des Themenbandes von DWA und VKU. In: Deponietage 2011 -Betrieb, Stilllegung und Nachsorge von Deponien. Hennef.

SHELL | 2009:

Shell Pkw-Szenarien bis 2030. Fakten, Trends und Handlungsoptionen für nachhaltige Auto-Mobilität. Shell Deutschland Oil GmbH, Hamburg. Abgerufen am 22.01.2010 unter www.shell.de/pkwszenarien

SHUVAL, H. | 1958:

Composting municipal garbage in Israel. Tavruau

SINDING, S. | 2007:

Wachstum der Weltbevölkerung. Berlin-Institut für Bevölkerung und Entwicklung, Demografische Analysen-Konzepte - Strategien, Berlin 2007. Abgerufen am 25.07.2010 unter http://www.berlin-institut.org/fileadmin/user_upload/handbuch_texte/pdf_Sinding_Wachstum_der_Weltbevoelkerung.pdf

SPENDLIN, H. H. | 1991:

Untersuchungen zur frühzeitigen Initiierung der Methanbildung bei festen Abfallstoffen. Hamburger Berichte 4.

SPIEGEL ONLINE | 2007:

Bis 2050 droht Verdopplung des Energiebedarfs. Abgerufen am 18.04.2010 unter <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/0,1518,516942,00.html>

STACHOWITZ, W. H. | 2004:

Rettenberger/ Tabasaran oder Dr. Weber/ Doedens - Gasprognose-Modelle, "Berechnung" oder Abschätzung von Gasproduktionsmengen - "Gasprognose", Kiel: DAS-IB GmbH.

STEGMANN, R. | 2010:

Untersuchungen zur Abfallbeschaffenheit und zum Deponieverhalten der Deponie Burghof - Abfallfeststoffanalysen im Zuge der Sanierung der Sickerwasserleitung S 6.1 und des Ausbaus des Gasdomes GD 83, Hamburg: Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft Prof. R. Stegmann und Partner | AVL - Abfallverwertungsgesellschaft des Landkreises Ludwigsburg mbH.

STEGMANN, R., HEYER, K.-U., HUPE, K. & WILLAND, A. | 2006:

Deponienachsorge – Handlungsoptionen, Dauer, Kosten und quantitative Kriterien für die Entlassung aus der Nachsorge, Dessau: Umweltbundesamt.

STEINERT ELEKTROMAGNETBAU GMBH | 2003:

Induktionssortiersystem ISS - Informationsmaterial. Abgerufen am 07.04.2011 unter www.steinert.de/uploads/media/Induktionssortiersystem.pdf

SUSSET, B. ET AL. | 2010:

Beurteilung des schadlosen und ordnungsgemäßen Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe. Zwischenbericht 2010. Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Berlin

T**THIESING, H | 1927:**

Beseitigung der festen Abfallstoffe. Handbuch der Hygiene. Band 2. Berlin.

THOMÉ-KOZMIENSKY, K. J. | 1985:

Kompostierung von Abfällen. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik.

THOMÉ-KOZMIENSKY, K. J. & PAHL, U. | 1994:

Deponierückbau oder Altlastensicherung?. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik.

TREND:RESEARCH | 2009:

Kraftwerke 2020 – Kapazitäten und Handlungsoptionen. Entwicklung der Stromerzeugung in

Deutschland: Von der Kostenoptimierung zum Wachstum?. Potenzialstudie – Zentrale und dezentrale Energieerzeugung. Institut für Trend- und Marktforschung.

TRENNSO-TECHNIK GMBH | 2011:

Trenn- und Sortiertechnik GmbH. Rohstoffe gewinnen. In perfekter Reinheit separiert!. Abgerufen am 24.05.2011 unter www.trennso-technik.de/zick-zack-sichter.html

U

UMSICHT | 2008:

Recycling für den Klimaschutz - Ergebnisse der Studie von Fraunhofer UMSICHT und INTERSEROH zur CO₂-Einsparung, Köln: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT.

UMWELTBUNDESAMT 1994:

Bundesweite Gewerbeabfalluntersuchung, Forschungsbericht, Berlin: ITU- Ingenieurschaft Technischer Umweltschutz GmbH.

UMWELTBUNDESAMT | 1999:

„Ökologischen Vertretbarkeit“ der mechanisch-biologischen Vorbehandlung von Restabfällen einschließlich deren Ablagerung, Berlin: Umweltbundesamt.

UMWELTBUNDESAMT | 2007:

Umweltdaten Deutschland. Nachhaltig wirtschaften – Natürliche Ressourcen und Umwelt schonen. Umweltbundesamt (UBA). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Statistisches Bundesamt (Destatis). Dessau/ Wiesbaden/ Hannover.

UN | 2011:

World Population to 2300. Abgerufen am 11.07.2011 unter www.un.org/esa/population/publications/longrange2/WorldPop2300final.pdf

V

VAN DER ZEE, D. J., ACHTERKAMP, M. C. & DE VISSER, B. J. | 2004:

Assessing the opportunities of landfill mining. Waste Management, Band 24 /8, S. 795-804.

VON ARX, U. | 2006:

Kupfer. Verbrauch, Umwelteinträge und -vorkommen. Umwelt-Wissen Nr. 0601. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern

W

WENGENROTH, K. | 1995:

Abfallwirtschaftliche Rekonstruktion von Altdeponien am Beispiel der Deponien Schöneiche und Schöneicher Plan. Berlin: Projektträger: Umweltbundesamt, Abfallwirtschaft und Altlastensanierung.

WIEMER, K., BARTSCH, B. & SCHMEISKY, H. | 2009:

Deponien als Rohstofflagerstätten von morgen - Ergebnisse einer hessenweiten Untersuchung. In: Bio- und Sekundärrohstoffverwertung IV - Neues aus Forschung und Praxis. Göttingen: Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, S. 685-716.

WIRTSCHAFTSVEREINIGUNG STAHL | 2010:

Stahl in Zahlen - Daten und Fakten zu Stahlerzeugung, Stahl-Außenhandel, Umsatzentwicklung und Beschäftigten abgerufen am 20.01.2010 unter www.//195.210.48.207/index.asp

WIRTSCHAFTS WOCHE | 2010:

Zukunft der Rohstoffe - Die Hightech-Gewürze. Quelle: Handelsblatt Online. Abgerufen am 08.08.2011 unter www.wiwo.de/technologie/zukunft-der-rohstoffe-die-hightech-gewuerze/5620118.html

WISKEMANN, B. | 1993:

Deponierückbau schafft Deponieraum. Entsorgungs Praxis, Band 5, S. 300-303.

WITTMAYER, M. & WOLFF, S. | 2011:

Rohstoffpotenziale in Deponien: Eine Lösung für die zukünftige Versorgung mit Metallen?. Re-source 2011. St. Gallen

WITZENHAUSEN – INSTITUT | 2001:

„Analyse von Rückbaumaterial“ aus Forschungsvorhaben: Wissenschaftliche Stoffstromanalyse verschiedener Inputmaterialien in der Trockenstabilat - Anlage Rennerod

WOLFGARTEN, S. | 2010:

Prognose des Sickerwasseraufkommens und der Sickerwasserqualität nach Abschluss der Abfallablagerung am Beispiel der Deponie Aßlar. Boden und Landschaft Band 54. Gießen 2010 ISBN: 3931789535

WOLFGARTEN, S. | 2011:

RE|CARBON Deutschland GmbH. Mündliche Absprache zum Thema Emissionshandel und CO₂-Zertifikatspreisen. Gießen

WORLD ENERGY COUNCIL | 2007:

Deciding the Future: Energy Policy Scenarios to 2050. United Kingdom ISBN: 0 946121 29

WUPPERTAL INSTITUT | 2008:

Kupfereffizienz - unerschlossene Potenziale, neue Perspektiven | Ergebnisse des „Zukunftsdialogs Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung“. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Wuppertal

Y

YOKOYAMA, K., ONDA, T., KASHIWAHURA, S. & NAGASAKA, T. | 2006:

Waste Input-Output Analysis on "Landfill Mining Activity". Materials Transactions, 47(10), S. 2582-2587.

Z

ZEIGER, E. | 2006:

Automatische Sortierung von Haus- und Gewerbeabfällen mit Röntgensortiertechnik. Abgerufen am 30.05.2011 unter www.mogensen.de/de/pdf/257_264_Zeiger.pdf

ZOLLERNALBKREIS | 2010:

Das Abfallwirtschaftskonzept des Zollernalbkreises, Hechingen: Zollernalbkreis.

9 ANHANG

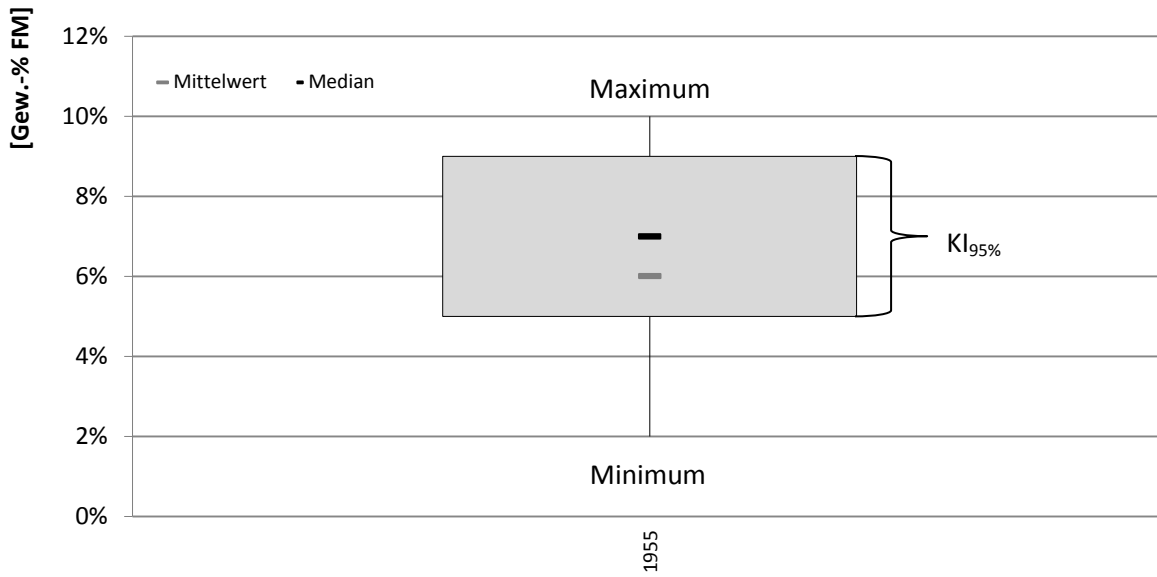
Anhang 1: Statistische Kenngrößen der dargestellten Boxplotabbildungen	246
Anhang 2: Liste der im Rahmen der Arbeit verwendeten Software	246
Anhang 3: Kosten und Erlöse des Deponierückbaus [Bölte & Geiping, 2011].....	247
Anhang 4: Ablagerung von Hausmüll nach Szenarien auf der Kreismülldeponie Hechingen.....	248
Anhang 5: Ablagerung von Gewerbeabfall nach Szenarien auf der Kreismülldeponie Hechingen	248
Anhang 6: Ablagerung von Sperrmüll nach Szenarien auf der Kreismülldeponie Hechingen	249
Anhang 7: Ablagerung von Sanden nach Szenarien auf der Kreismülldeponie Hechingen	249
Anhang 8: Ablagerung von Schlämmen nach Szenarien auf der Kreismülldeponie Hechingen	250
Anhang 9: Ablagerung von Bauschutt nach Szenarien auf der Kreismülldeponie Hechingen.....	250
Anhang 10: Ablagerung von Rekultivierungsmaterialien nach Szenarien auf der Kreismülldeponie Hechingen	251
Anhang 11: Absolute Ablagerungsmengen auf der Kreismülldeponie Hechingen nach Abfallarten und deren Mengenspannweite.....	251
Anhang 12: Massenanteil der einzelnen Abfallarten an der Gesamtablagerungsmenge auf der Kreismülldeponie Hechingen.....	252
Anhang 13: Jahresspezifische Volumenermittlung der Kreismülldeponie Hechingen [Mauthe Ingenieur- und Architekturbüro, 2011].....	253
Anhang 14: Übersichtsplan zur lokalen Ablagerungsmächtigkeit auf der Kreismülldeponie Hechingen für die Jahre 1982 – 1985	253
Anhang 15: Übersichtsplan zur lokalen Ablagerungsmächtigkeit auf der Kreismülldeponie Hechingen für die Jahre 1985 – 1987	254
Anhang 16: Übersichtsplan zur lokalen Ablagerungsmächtigkeit auf der Kreismülldeponie Hechingen für die Jahre 1987 – 1988	254
Anhang 17: Übersichtsplan zur lokalen Ablagerungsmächtigkeit auf der Kreismülldeponie Hechingen für die Jahre 1988 – 1989	255
Anhang 18: Übersichtsplan zur lokalen Ablagerungsmächtigkeit auf der Kreismülldeponie Hechingen für die Jahre 1989 – 1990	255
Anhang 19: Übersichtsplan zur lokalen Ablagerungsmächtigkeit auf der Kreismülldeponie Hechingen für die Jahre 1990 – 1991	256
Anhang 20: Übersichtsplan zur lokalen Ablagerungsmächtigkeit auf der Kreismülldeponie Hechingen für die Jahre 1991 – 1995	256
Anhang 21: Übersichtsplan zur lokalen Ablagerungsmächtigkeit auf der Kreismülldeponie Hechingen für die Jahre 1995 – 2003	257
Anhang 22: Übersichtsplan zur lokalen Ablagerungsmächtigkeit auf der Kreismülldeponie Hechingen für die Jahre 2003 – 2011	257
Anhang 23: Erfasster Tiefenbereich und Ablagerungszeitraum des Bohrlochs BI/1 der Kreismülldeponie Hechingen	258
Anhang 24: Erfasster Tiefenbereich und Ablagerungszeitraum des Bohrlochs BI/2 der Kreismülldeponie Hechingen	258
Anhang 25: Erfasster Tiefenbereich und Ablagerungszeitraum des Bohrlochs BI/3 der Kreismülldeponie Hechingen	259
Anhang 26: Erfasster Tiefenbereich und Ablagerungszeitraum des Bohrlochs BI/4 der Kreismülldeponie Hechingen	259
Anhang 27: Erfasster Tiefenbereich und Ablagerungszeitraum des Bohrlochs BI/5 der Kreismülldeponie Hechingen	260
Anhang 28: Erfasster Tiefenbereich und Ablagerungszeitraum des Bohrlochs BI/6 der Kreismülldeponie Hechingen	260
Anhang 29: Erfasster Tiefenbereich und Ablagerungszeitraum des Bohrlochs BII/1 der Kreismülldeponie Hechingen	261

Anhang 30: Erfasster Tiefenbereich und Ablagerungszeitraum des Bohrlochs BI/2 der Kreismülldeponie Hechingen	261
Anhang 31: Erfasster Tiefenbereich und Ablagerungszeitraum des Bohrlochs BI/3 der Kreismülldeponie Hechingen	262
Anhang 32: Spezifische Korngrößenverteilung der einzelnen Deponiegutchargen für die Bohrstaffel I (BI) und die Bohrstaffel II (BII) unter Berücksichtigung der FM	262
Anhang 33: Spezifische Korngrößenverteilung der einzelnen Deponiegutchargen für die Bohrstaffel I (BI) und die Bohrstaffel II (BII) unter Berücksichtigung der TM	263
Anhang 34: Korngrößenanteile der Fraktionen < 5 mm, 5 – 35 mm und > 35 mm in Abhängigkeit des Ablagerungsalters	263
Anhang 35: Räumliche Verteilung der mittleren Korngrößenanteile der Fraktion < 5 mm unter Berücksichtigung der TM	264
Anhang 36: Räumliche Verteilung der mittleren Korngrößenanteile der Fraktion 5 – 35 mm unter Berücksichtigung der TM.....	264
Anhang 37: Räumliche Verteilung der mittleren Korngrößenanteile der Fraktion > 35 mm unter Berücksichtigung der TM	265
Anhang 38: Tiefenprofil des Wassergehalts BI/1 der Kreismülldeponie Hechingen.....	265
Anhang 39: Tiefenprofil des Wassergehalts BI/2 der Kreismülldeponie Hechingen.....	266
Anhang 40: Tiefenprofil des Wassergehalts BI/3 der Kreismülldeponie Hechingen.....	266
Anhang 41: Tiefenprofil des Wassergehalts BI/4 der Kreismülldeponie Hechingen.....	266
Anhang 42: Tiefenprofil des Wassergehalts BI/5 der Kreismülldeponie Hechingen.....	267
Anhang 43: Tiefenprofil des Wassergehalts BI/6 der Kreismülldeponie Hechingen.....	267
Anhang 44: Tiefenprofil des Wassergehalts BII/1 der Kreismülldeponie Hechingen.....	267
Anhang 45: Zusammenfassendes Tiefenprofil des Wassergehalts Feinfraktion der Kreismülldeponie Hechingen.....	268
Anhang 46: Zusammenfassendes Tiefenprofil des Wassergehalts Grobfraktion der Kreismülldeponie Hechingen	268
Anhang 47: Tiefenprofil des Glühverlustes BI/1 der Kreismülldeponie Hechingen	268
Anhang 48: Tiefenprofil des Glühverlustes BI/2 der Kreismülldeponie Hechingen.....	269
Anhang 49: Tiefenprofil des Glühverlustes BI/3 der Kreismülldeponie Hechingen	269
Anhang 50: Tiefenprofil des Glühverlustes BI/4 der Kreismülldeponie Hechingen.....	269
Anhang 51: Tiefenprofil des Glühverlustes BI/5 der Kreismülldeponie Hechingen.....	270
Anhang 52: Tiefenprofil des Glühverlustes BI/6 der Kreismülldeponie Hechingen.....	270
Anhang 53: Zusammenfassendes Tiefenprofil des Glühverlustes Feinfraktion der Kreismülldeponie Hechingen	270
Anhang 54: Zusammenfassendes Tiefenprofil des Glühverlustes Grobfraktion der Kreismülldeponie Hechingen	271
Anhang 55: Modellierung der Deponiegasproduktion Zeitraum 1982 - 2050.....	272
Anhang 56: Modellierung der abgebauten org. Substanz Zeitraum 1982 - 2050.....	273
Anhang 57: Gefasste und entsorgte Gasmengen - 2000 bis 2009	274
Anhang 58: Kennwerte der Linearen Trendableitung zur zeitspezifischen Hausmüllzusammensetzung und zum spezifischen Hausmüllaufkommen (Übertragbarkeit nur gewährleistet bei Verwendung von MS-Excel oder Datumstransformation).....	274

Anhang 59: Kennwerte der Gewerbeabfallanalyse [Gew.-% FM]	276
Anhang 60: Kennwerte der Zusammensetzung von Sperrmüll [Gew.-% FM]	279
Anhang 61: Prozentuale Verteilung der Stoffgruppen unter Berücksichtigung der Variation der Ablagerungsmenge	279
Anhang 62: Modelliertes Ablagerungspotenzial und Variation nach Stofffraktionen unter Berücksichtigung der definierten Gesamtablagerungsmengen und der mittleren Abfallzusammensetzung nach Abfallarten Einzelbetrachtung Theorie	279
Anhang 63: Prozentuale Verteilung der Stoffgruppen unter Berücksichtigung der Variation der Abfallzusammensetzung	280
Anhang 64: Modelliertes Ablagerungspotenzial und Variation nach Stofffraktionen unter Berücksichtigung der Variation der Abfallzusammensetzung bei mittlerer Gesamtablagerungsmenge Einzelbetrachtung Theorie	280
Anhang 65: Theoretisches Ressourcenpotenzial der Kreismülldeponie Hechingen unter Berücksichtigung des Abbaus der organischen Substanz	281
Anhang 66: Theoretisches Ressourcenpotenzial der Kreismülldeponie Hechingen unter Berücksichtigung des Abbaus der organischen Substanz und stoffspezifischer Wassergehalte	281
Anhang 67: Bohrlochspezifische Zusammensetzung des Deponieguts der in-situ Sortierung unter Berücksichtigung der Nachsortierung der Sortierreste	282
Anhang 68: Mittlere Zusammensetzung des Deponieguts der in-situ Sortierung unter Berücksichtigung der Nachsortierung der Sortierreste nach Bohrstaffeln	282
Anhang 69: Mittlere jahresspezifische Gehalte an Fe-Metallen und deren Standardabweichung unter Berücksichtigung der Gesamtuntersuchungsmasse	283
Anhang 70: Mittlere jahresspezifische Gehalte an NE-Metallen und deren Standardabweichung unter Berücksichtigung der Gesamtuntersuchungsmasse	283
Anhang 71: Mittlere jahresspezifische Gehalte an PPK und deren Standardabweichung unter Berücksichtigung der Gesamtuntersuchungsmasse	283
Anhang 72: Mittlere jahresspezifische Gehalte an Glas und deren Standardabweichung unter Berücksichtigung der Gesamtuntersuchungsmasse	284
Anhang 73: Mittlere jahresspezifische Gehalte an Kunststoffen und deren Standardabweichung unter Berücksichtigung der Gesamtuntersuchungsmasse	284
Anhang 74: Mittlere jahresspezifische Gehalte an Holz und deren Standardabweichung unter Berücksichtigung der Gesamtuntersuchungsmasse	284
Anhang 75: Mittlere jahresspezifische Gehalte an Textilien und deren Standardabweichung unter Berücksichtigung der Gesamtuntersuchungsmasse	285
Anhang 76: Mittlere jahresspezifische Gehalte an Mineralstoffen und deren Standardabweichung unter Berücksichtigung der Gesamtuntersuchungsmasse	285
Anhang 77: Mittlere jahresspezifische Gehalte an Verpackungen und deren Standardabweichung unter Berücksichtigung der Gesamtuntersuchungsmasse	285
Anhang 78: Mittlere jahresspezifische Gehalte an Kompl. Produkten und deren Standardabweichung unter Berücksichtigung der Gesamtuntersuchungsmasse	286
Anhang 79: Mittlere jahresspezifische Gehalte an Schadstoffen und deren Standardabweichung unter Berücksichtigung der Gesamtuntersuchungsmasse	286
Anhang 80: Mittlere jahresspezifische Gehalte an Stoffen ang. und deren Standardabweichung unter Berücksichtigung der Gesamtuntersuchungsmasse	286

Anhang 81: Mittlere jahresspezifische Gehalte an Sortierresten und deren Standardabweichung unter Berücksichtigung der Gesamtuntersuchungsmasse.....	287
Anhang 82: Mittlere räumliche Verteilung der Gehalte an Verpackungen In-situ Sortierung.....	288
Anhang 83: Mittlere räumliche Verteilung der Gehalte an Fe-Metallen In-situ Sortierung	288
Anhang 84: Mittlere räumliche Verteilung der Gehalte an Glas In-situ Sortierung.....	289
Anhang 85: Mittlere räumliche Verteilung der Gehalte an Holz In-situ Sortierung.....	289
Anhang 86: Mittlere räumliche Verteilung der Gehalte an komplexen Produkten In-situ Sortierung	290
Anhang 87: Mittlere räumliche Verteilung der Gehalte an Kunststoffen In-situ Sortierung	290
Anhang 88: Mittlere räumliche Verteilung der Gehalte an Mineralstoffen In-situ Sortierung.....	291
Anhang 89: Mittlere räumliche Verteilung der Gehalte an NE-Metallen In-situ Sortierung.....	291
Anhang 90: Mittlere räumliche Verteilung der Gehalte an Organik In-situ Sortierung	292
Anhang 91: Mittlere räumliche Verteilung der Gehalte an PPK In-situ Sortierung.....	292
Anhang 92: Mittlere räumliche Verteilung der Gehalte an Schadstoffen In-situ Sortierung.....	293
Anhang 93: Mittlere räumliche Verteilung der Gehalte an Sortierresten In-situ Sortierung.....	293
Anhang 94: Mittlere räumliche Verteilung der Gehalte an Stoffen ang. In-situ Sortierung	294
Anhang 95: Mittlere räumliche Verteilung der Gehalte an Textilien In-situ Sortierung	294
Anhang 96: Zusammensetzung der Fraktion < 35 mm in Bezug zur Gesamtmasse < 35 mm	295
Anhang 97: Mittlere Zusammensetzung der Fraktion < 35 mm in Bezug zur Gesamtmasse < 35 mm nach Bohrstaffeln	295
Anhang 98: Zusammensetzung der Fraktion < 35 mm in Bezug zur Gesamtmasse 5 - 35 mm	296
Anhang 99: Mittlere Zusammensetzung der Fraktion < 35 mm in Bezug zur Gesamtmasse 5 - 35 mm nach Bohrstaffeln	296
Anhang 100: Auswirkung der Variation der Ablagerungsmenge auf das Stoffpotenzial der Kreismülldeponie Hechingen bei gleichbleibender Deponiegutzusammensetzung Gesamtbetrachtung Real	297
Anhang 101: Modelliertes Ablagerungspotenzial und Variation nach Stofffraktionen unter Berücksichtigung der definierten Gesamtablagerungsmengen und der mittleren Deponiegutzusammensetzung nach Abfallarten Einzelbetrachtung Real ..	298
Anhang 102: Variationskoeffizient der abgelagerten Stofffraktionen unter Betrachtung der mittleren stoffspezifischen Gesamtablagerungsmenge Variation Ablagerungsmenge Real	298
Anhang 103: Auswirkung der Variation der Deponiegutzusammensetzung unter Berücksichtigung der mittleren Gesamtablagerungsmenge Gesamtbetrachtung Real	299
Anhang 104: Modelliertes Ablagerungspotenzial und Variation nach Stofffraktionen unter Berücksichtigung der Variation der Deponiegutzusammensetzung bei mittlerer Gesamtablagerungsmenge Einzelbetrachtung Real.....	299
Anhang 105: CO ₂ -Einsparpotenzial durch Recycling einzelner Stoffgruppen.....	300
Anhang 106: Mittlerer Gesamtheizwert der heizwertreichen Fraktion	300
Anhang 107: Heizwertberechnung unter Berücksichtigung spezifischer Heizwerte und mittlerer Deponiegutzusammensetzung.....	301

Anhang 108: Anlagenkonfiguration zur Berechnung des spez. Energieverbrauchs der Aufbereitung basierend auf der bestehenden Anlage des Recyclingunternehmens Korn [Korn, 2011].....	302
Anhang 109: Kostenkalkulation der Nachsorge nach Burkhardt & Egloffstein [2005]	303
Anhang 110: Kostenkalkulation der Nachsorge nach Bölte & Geiping [2011]	304
Anhang 111: Kostenkalkulation der Nachsorge nach Eitner [2010c]	305
Anhang 112: Kostenkalkulation der Nachsorge nach Stegmann et al. [2006]	306
Anhang 113: Zusammenfassende Darstellung der Nachsorgekostenkalkulation (Basisdaten sind Anhang 96 - 99 zu entnehmen).....	307



ANHANG 1: STATISTISCHE KENNGRÖßEN DER DARGESTELLTEN BOXPLOTABBILDUNGEN

ANHANG 2: LISTE DER IM RAHMEN DER ARBEIT VERWENDETEN SOFTWARE

Softwarefamilie	Verwendete Komponenten
Microsoft Office 2010	Microsoft Word
	Microsoft Excel
	Microsoft Visio
	Microsoft Access
PASW Statistics 18	SPSS 18
ArcGIS	ArcCatalog
	ArcMap
	ArcScene

ANHANG 3: KOSTEN UND ERLÖSE DES DEPONIERÜCKBAUS [BÖLTE & GEIPING, 2011]

Variante 1

Kosten/ Gewinn bei Rückbau nach Variante 1: Verbringung der heizwertreichen Fraktion in die MVA und Verbringung der < 40 mm in die MBA	Gesamtpreis	Preis pro Mg abgebautes Material	Einheitspreise	
Rückbaukosten	€	€*Mg ⁻¹		
Aufnahme	11.128.448	5	5	€*Mg ⁻¹
Aufbereitung	22.256.896	10	10	€*Mg ⁻¹
Kosten/Erlöse Entsorgung				
Entsorgung MVA-Material	12.476.337	6	90	€*Mg ⁻¹
Entsorgung heizwertreiche Fraktion	18.945.685	9	50	€*Mg ⁻¹
Entsorgung SBS	1.123.264	1	10	€*Mg ⁻¹
Entsorgung des Materials < 40 mm (MBA)	148.055.751	67	105	€*Mg ⁻¹
Entsorgung Fe-Metalle	- 2.680.830	- 1	- 100	€*Mg ⁻¹
Entsorgung NE-Metalle	- 4.257.858	- 2	- 400	€*Mg ⁻¹
Transport	22.256.896	10	10	€*Mg ⁻¹
Laufende Kosten bis zur Fertigstellung des Rückbaus				
Betriebskosten	14.700.000	7	980.000	€*a ⁻¹
Spezifische Gesamtkosten	244.004.589	110		

Variante 2

Kosten/ Gewinn bei Rückbau nach Variante 2: Verbringung des gesamten Materials in der MVA	Gesamtpreis	Preis pro Mg abgebautes Material	Einheitspreise	
Rückbaukosten	€	€*Mg ⁻¹		
Aufnahme	11.128.448	5	5	€*Mg ⁻¹
Aufbereitung	22.256.896	10	10	€*Mg ⁻¹
Kosten/Erlöse Entsorgung				
Entsorgung MVA-Material	139.381.266	63	90	€*Mg ⁻¹
Entsorgung heizwertreiche Fraktion	18.945.685	9	50	€*Mg ⁻¹
Entsorgung SBS	1.123.264	1	10	€*Mg ⁻¹
Entsorgung des Materials < 40 mm (MBA)	-	-	105	€*Mg ⁻¹
Entsorgung Fe-Metalle	- 2.680.830	- 1	- 100	€*Mg ⁻¹
Entsorgung NE-Metalle	- 4.257.858	- 2	- 400	€*Mg ⁻¹
Transport	22.256.896	10	10	€*Mg ⁻¹
Laufende Kosten bis zur Fertigstellung des Rückbaus				
Betriebskosten	14.700.000	7	980.000	€*a ⁻¹
Spezifische Gesamtkosten	222.853.767	100		

Variante 3

Kosten/ Gewinn bei Rückbau nach Variante 3: Wiedereinbau am Standort ohne Wertstoffe	Gesamtpreis	Preis pro Mg abgebautes Material	Einheitspreise	
Rückbaukosten	€	€*Mg ⁻¹		
Aufnahme	11.128.448	5	5	€*Mg ⁻¹
Aufbereitung	22.256.896	10	10	€*Mg ⁻¹
Kosten/Erlöse Entsorgung				
Entsorgung MVA-Material	-	-	90	€*Mg ⁻¹
Entsorgung heizwertreiche Fraktion	18.945.685	9	50	€*Mg ⁻¹
Entsorgung SBS	1.123.264	1	10	€*Mg ⁻¹
Entsorgung des Materials < 40 mm (MBA)	-	-	105	€*Mg ⁻¹
Entsorgung Fe-Metalle	- 2.680.830	- 1	- 100	€*Mg ⁻¹
Entsorgung NE-Metalle	- 4.257.858	- 2	- 400	€*Mg ⁻¹
Transport	5.286.930	2	10	€*Mg ⁻¹
Wiedereinbau				
Einbau	7.743.404	3	5	€*Mg ⁻¹
Basisabdichtung	11.352.000	5	120	€*m ⁻²
Oberflächenabdichtung	5.676.000	3	60	€*m ⁻²
Betriebskosten (vor der Fertigstellung)	11.760.000	5	980.000	€*a ⁻¹
Sickerwasser- und Gasentsorgung	3.795.000	2	345.000	€*a ⁻¹
Betriebskosten (nach Fertigstellung)	3.600.000	2	100.000	€*a ⁻¹
Spezifische Gesamtkosten bei Rückbau	95.728.939	43		

ANHANG 4: ABLAGERUNG VON HAUSMÜLL NACH SZENARIEN AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

Jahr	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5	MIN	MAX	MW	SD
[Mg FM]									
1982	43.639		55.581		52.560	43.639	55.581	50.594	6.209
1983	48.039		54.537		52.000	48.039	54.537	51.525	3.275
1984	50.054		54.575		53.200	50.054	54.575	52.610	2.318
1985	52.751		54.608		53.800	52.751	54.608	53.719	931
1986	54.881		55.219		55.280	54.881	55.280	55.127	215
1987	61.672		56.232			56.232	61.672	58.952	3.847
1988			53.571			53.571	53.571	53.571	
1989		53.688	51.257	51.362		51.257	53.688	52.102	1.374
1990		50.926	49.203	49.147		49.147	50.926	49.759	1.011
1991		47.845	46.259	46.282		46.259	47.845	46.795	909
1992		31.474	28.022	30.493		28.022	31.474	29.996	1.779
1993		25.538	24.434	24.792		24.434	25.538	24.921	564
1994		26.251	25.164	25.720		25.164	26.251	25.712	544
1995		19.284	18.039	18.669		18.039	19.284	18.664	623
1996		19.640	18.609	19.458		18.609	19.640	19.236	550
1997		20.207	18.953	19.170		18.953	20.207	19.443	670
1998		21.805	17.339	20.610		17.339	21.805	19.918	2.312
1999		24.256	18.847	24.284		18.847	24.284	22.462	3.131
2000		24.461	19.927	24.485		19.927	24.485	22.958	2.625
2001		17.721	14.413	17.731		14.413	17.731	16.622	1.913
2002		14.998	14.201	15.014		14.201	15.014	14.738	465
2003		14.391	13.915	14.412		13.915	14.412	14.239	281
2004		14.711	14.192	14.780		14.192	14.780	14.561	321
2005		7.197	7.020	7.233		7.020	7.233	7.150	114
Summe						758.905	824.422	795.373	35.979

ANHANG 5: ABLAGERUNG VON GEWERBEABFALL NACH SZENARIEN AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

Jahr	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5	MIN	MAX	MW	SD
[Mg FM]									
1982	51.064		38.868		39.040	38.868	51.064	42.991	6.992
1983	51.232		40.510		41.760	40.510	51.232	44.501	5.863
1984	48.487		41.122		42.680	41.122	48.487	44.096	3.882
1985	44.898		41.180		43.800	41.180	44.898	43.293	1.910
1986	45.321		43.281		45.800	43.281	45.800	44.801	1.338
1987	42.558		47.197			42.558	47.197	44.878	3.280
1988	32.515		35.042			32.515	35.042	33.778	1.786
1989		38.283	33.672	22.561		22.561	38.283	31.505	8.082
1990		47.693	53.654	55.630		47.693	55.630	52.326	4.132
1991		47.143	51.777	54.700		47.143	54.700	51.206	3.811
1992		27.421	29.714	33.865		27.421	33.865	30.333	3.266
1993		24.063	27.278	29.448		24.063	29.448	26.929	2.709
1994		23.957	23.591	25.893		23.591	25.893	24.480	1.237
1995		16.817	18.562	19.266		16.817	19.266	18.215	1.261
1996		14.417	14.635	14.676		14.417	14.676	14.576	139
1997		14.418	15.435	15.125		14.418	15.435	14.993	522
1998		8.757	11.485	9.302		8.757	11.485	9.848	1.444
1999		9.770	11.717	10.350		9.770	11.717	10.613	1.000
2000		10.119	12.149	10.869		10.119	12.149	11.046	1.027
2001		9.869	12.424	10.715		9.869	12.424	11.003	1.302
2002		10.236	11.789	11.054		10.236	11.789	11.027	777
2003		9.003	9.436	9.678		9.003	9.678	9.372	342
2004		9.265	10.691	10.293		9.265	10.691	10.083	736
2005		4.811	3.940	5.627		3.940	5.627	4.793	844
Summe						589.114	696.475	640.683	57.680

ANHANG 6: ABLAGERUNG VON SPERRMÜLL NACH SZENARIEN AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

Jahr	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5	MIN	MAX	MW	SD
[Mg FM]									
1982	3.326		4.185		3.800	3.326	4.185	3.770	430
1983	3.481		4.364		3.960	3.481	4.364	3.935	442
1984	3.653		4.580		4.160	3.653	4.580	4.131	464
1985	3.166		3.970		3.600	3.166	3.970	3.579	402
1986	4.477		5.614		5.120	4.477	5.614	5.070	570
1987	4.730		5.929			4.730	5.929	5.329	848
1988			4.537			4.537	4.537	4.537	
1989		5.515	7.242	5.515		5.515	7.242	6.091	997
1990		8.452	8.469	8.452		8.452	8.469	8.457	10
1991		7.581	7.589	7.581		7.581	7.589	7.584	5
1992		7.214	7.231	7.214		7.214	7.231	7.219	10
1993		6.031	6.008	6.031		6.008	6.031	6.024	14
1994		6.191	6.186	6.191		6.186	6.191	6.189	3
1995		3.062	3.062	3.062		3.062	3.062	3.062	0
1996		2.470	2.469	2.470		2.469	2.470	2.469	0
1997		2.462	2.458	2.462		2.458	2.462	2.461	2
1998		1.327	1.308	1.327		1.308	1.327	1.321	11
1999		2.710	2.504	2.710		2.504	2.710	2.641	119
2000		2.642	2.516	2.642		2.516	2.642	2.600	73
2001		2.904	2.709	2.904		2.709	2.904	2.839	113
2002		2.540	2.434	2.540		2.434	2.540	2.505	61
2003		2.538	2.440	2.538		2.440	2.538	2.505	56
2004		2.604	2.568	2.604		2.568	2.604	2.592	21
2005		2.814	2.789	2.814		2.789	2.814	2.806	15
Summe						95.580	104.003	99.715	4.666

ANHANG 7: ABLAGERUNG VON SANDEN NACH SZENARIEN AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

Jahr	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5	MIN	MAX	MW	SD
[Mg FM]									
1982						2.129	3.807	3.064	1.187
1983						2.086	3.744	3.009	1.173
1984						2.042	3.681	2.954	1.159
1985						1.999	3.618	2.900	1.145
1986						1.955	3.555	2.845	1.131
1987						1.911	3.492	2.790	1.117
1988			3.511			3.511	3.511	3.511	
1989		2.075	3.739	688		688	3.739	2.167	1.528
1990		2.214	3.892	1.492		1.492	3.892	2.533	1.231
1991		2.514	2.524	1.457		1.457	2.524	2.165	613
1992		2.783	2.799	1.967		1.967	2.799	2.517	476
1993		3.714	3.432	1.688		1.688	3.714	2.945	1.097
1994		3.023	3.096	1.133		1.133	3.096	2.417	1.113
1995		3.130	3.225	1.806		1.806	3.225	2.720	793
1996		2.516	2.749	1.504		1.504	2.749	2.256	662
1997		2.580	2.969	1.796		1.796	2.969	2.448	598
1998		2.862	3.152	2.238		2.238	3.152	2.751	467
1999		1.263	1.806	679		679	1.806	1.250	563
2000		906	1.337	133		133	1.337	792	610
2001		2.167	2.548	1.340		1.340	2.548	2.019	618
2002		2.681	1.495	1.877		1.495	2.681	2.018	606
2003		798	1.373	116		116	1.373	762	629
2004		3.014	3.510	1.975		1.975	3.510	2.833	784
2005		2.798	3.430	1.931		1.931	3.430	2.720	753
Summe						39.071	73.953	58.384	20.052

ANHANG 8: ABLAGERUNG VON SCHLÄMMEN NACH SZENARIEN AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

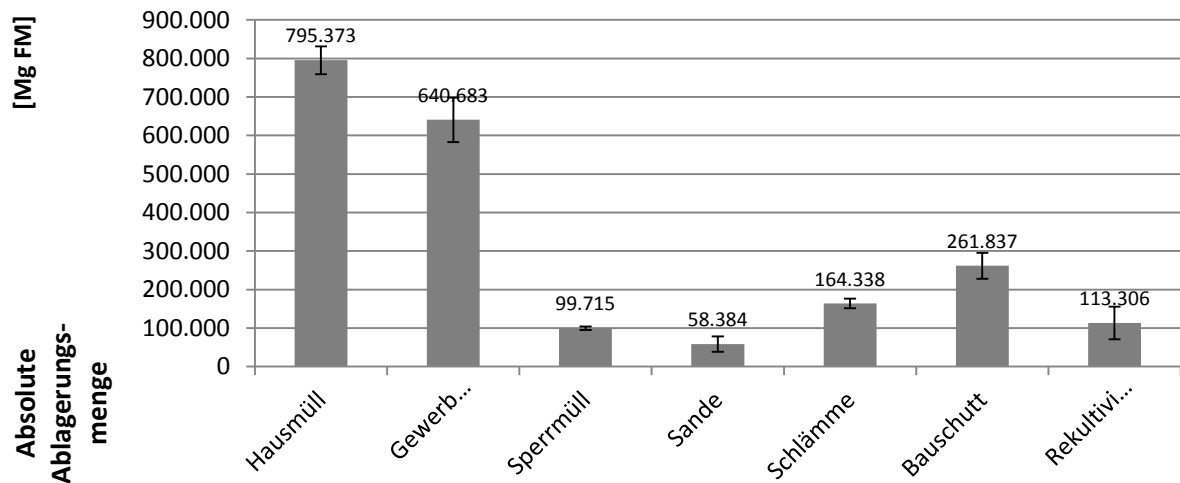
Jahr	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5	MIN	MAX	MW	SD
[Mg FM]									
1982	6.055		4.826			4.826	6.055	5.441	869
1983	6.469		5.311			5.311	6.469	5.890	819
1984	6.175		5.091			5.091	6.175	5.633	766
1985	9.256		7.631			7.631	9.256	8.443	1.149
1986	11.328		9.340			9.340	11.328	10.334	1.406
1987	14.650		12.162			12.162	14.650	13.406	1.759
1988			15.063			15.063	15.063	15.063	
1989			16.211			16.211	16.211	16.211	
1990			16.837			16.837	16.837	16.837	
1991			18.804			18.804	18.804	18.804	
1992			8.543			8.543	8.543	8.543	
1993		10.273	10.915	10.109		10.109	10.915	10.432	426
1994		11.001	10.988	11.001		10.988	11.001	10.997	8
1995		6.140	6.135	6.140		6.135	6.140	6.138	3
1996		3.716	2.919	3.716		2.919	3.716	3.450	460
1997		1.997	1.719	1.997		1.719	1.997	1.904	161
1998		76	56	76		56	76	69	11
1999		74	7.484	74		74	7.484	2.544	4.278
2000		56	41	56		41	56	51	8
2001		27	21	27		21	27	25	4
2002		63	27	36		27	63	42	19
2003		13	9	10		9	13	11	2
2004		3.068	2.699	3.068		2.699	3.068	2.945	213
2005		1.117	1.140	1.117		1.117	1.140	1.124	13
Summe						155.732	175.088	164.338	12.375

ANHANG 9: ABLAGERUNG VON BAUSCHUTT NACH SZENARIEN AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

Jahr	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5	MIN	MAX	MW	SD
[Mg FM]									
1982	15.724					15.724	17.600	16.662	1.326
1983	13.134					13.134	13.200	13.167	46
1984	16.243					16.243	16.940	16.592	493
1985	10.442					10.442	14.740	12.591	3.039
1986	13.427					13.427	18.150	15.789	3.339
1987	14.091					14.091	14.091	14.091	
1988	1.447					1.447	1.447	1.447	
1989		5.421				5.421	5.421	5.421	
1990		12.469		12.469		12.469	12.469	12.469	0
1991		10.817		10.817		10.817	10.817	10.817	0
1992									
1993									
1994									
1995									
1996									
1997									
1998		823		823		823	823	823	0
1999		11.415		12.056		11.415	12.056	11.736	453
2000		549		549		549	549	549	0
2001		3.406		14.374		3.406	14.374	8.890	7.756
2002		1.639		12.349		1.639	12.349	6.994	7.574
2003		2.631		15.941		2.631	15.941	9.286	9.411
2004				37.122		37.122	37.122	37.122	
2005				67.391		67.391	67.391	67.391	
Summe						238.193	285.481	261.837	33.438

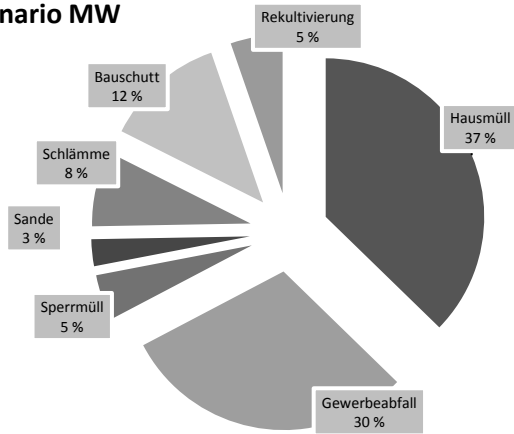
ANHANG 10: ABLAGERUNG VON REKULTIVIERUNGSMATERIALIEN NACH SZENARIOEN AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

Jahr	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5	MIN	MAX	MW	SD
[Mg FM]									
1982									
1983									
1984									
1985									
1986									
1987									
1988									
1989									
1990									
1991									
1992									
1993									
1994									
1995									
1996									
1997									
1998									
1999		1.179		1.179		1.179	1.179	1.179	
2000		1.281		1.281		1.281	1.281	1.281	
2001		3.627		6.716		3.627	6.716	5.172	2.184
2002		1.530		22.057		1.530	22.057	11.793	14.515
2003		1.940		38.491		1.940	38.491	20.216	25.846
2004				24.335		24.335	24.335	24.335	
2005				49.331		49.331	49.331	49.331	
Summe						83.223	143.389	113.306	42.544

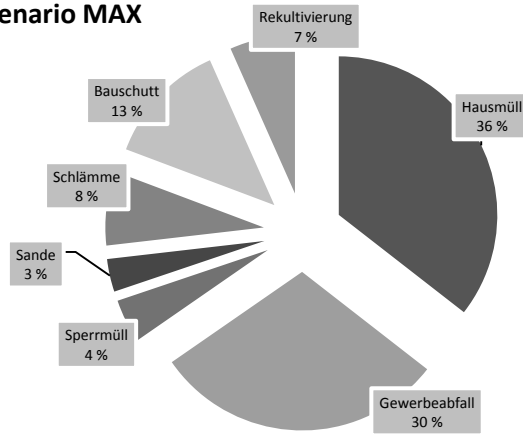


ANHANG 11: ABSOLUTE ABLAGERUNGSMENGEN AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN NACH ABFALLARTEN UND DEREN MENGENSPANNWEITE

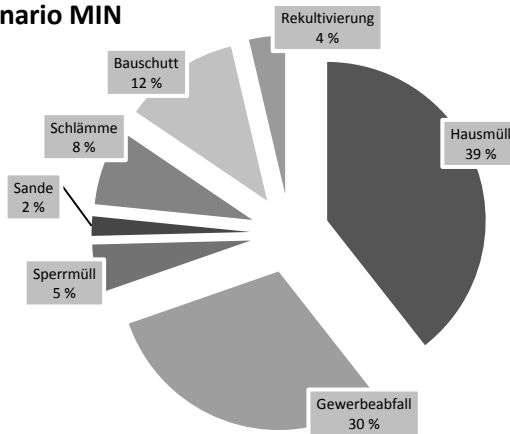
Szenario MW



Szenario MAX



Szenario MIN

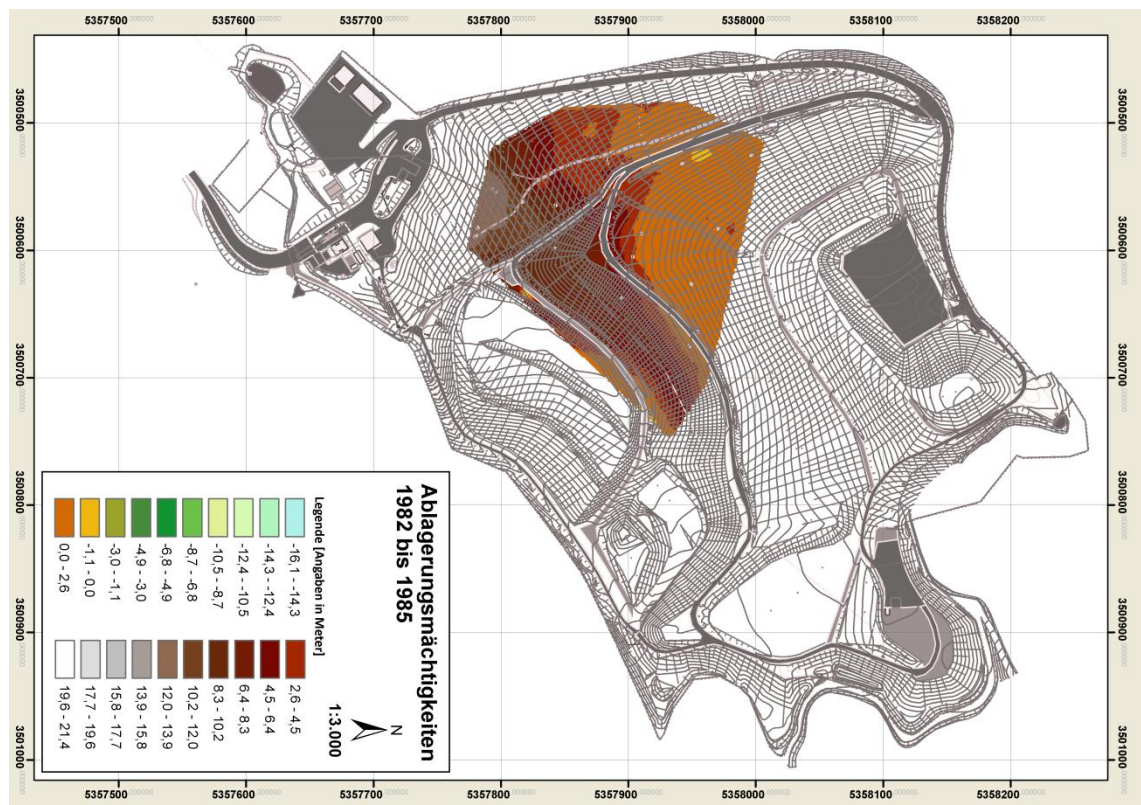


ANHANG 12: MASSENANTEIL DER EINZELNEN ABFALLARTEN AN DER GESAMTABLAGERUNGSMENGE AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

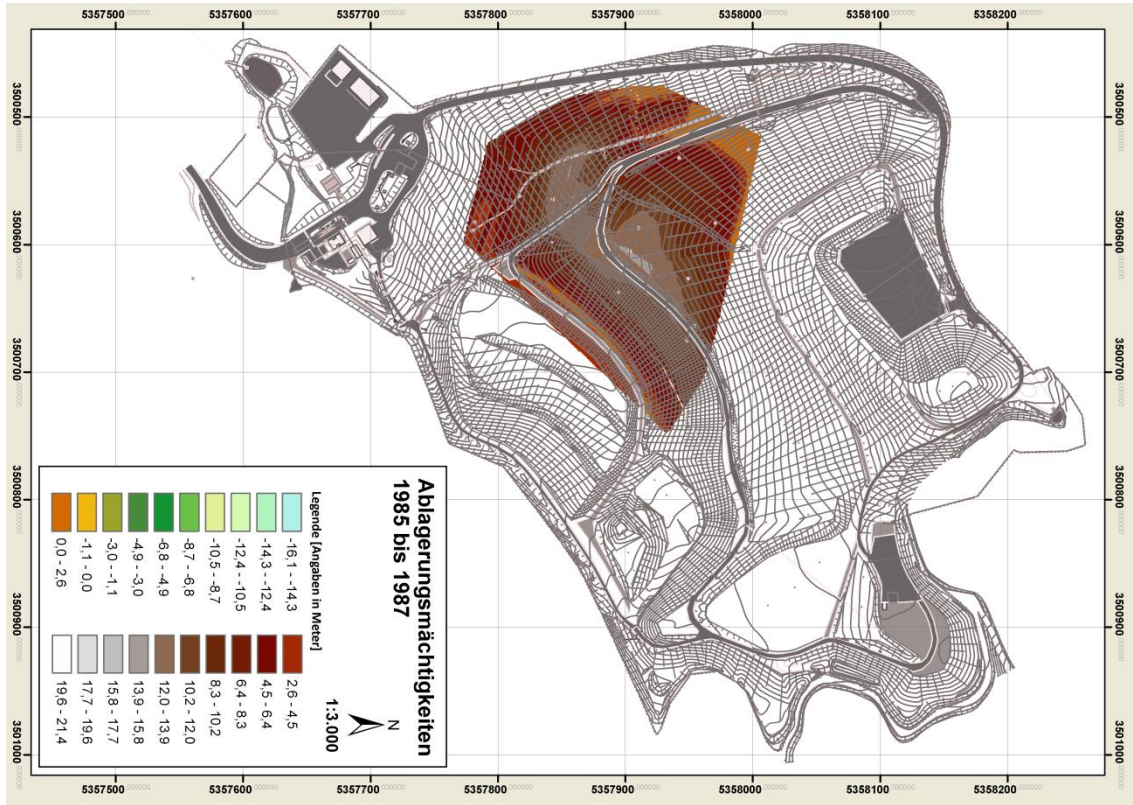
ANHANG 13: JAHRESSPEZIFISCHE VOLUMENERMITTLUNG DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN [MAUTHE INGENIEUR- UND ARCHITEKTURBÜRO, 2011]

	Jahr		Einbauzeit		Einbauvolumen		
	von	bis	Einbautage	[m³ FM*a⁻¹]	[m³ FM]	[m³ FM*d⁻¹]	
Phase I	1982 und 1983	01.09.1982	15.02.1984	532	283.683	283.683	533,24
	1984	15.02.1984	25.02.1985	376	157.505	441.188	418,90
	1985	25.02.1985	30.03.1986	398	142.560	583.748	358,19
	1986	30.03.1986	15.04.1987	381	162.720	746.468	427,09
	1987	15.04.1987	14.04.1988	365	155.740	902.208	426,68
	1988	14.04.1988	03.01.1989	264	143.630	1.045.838	544,05
	1989	03.01.1989	03.01.1990	365	139.730	1.185.568	382,82
	1990	03.01.1990	30.01.1991	392	146.880	1.332.448	374,69
	1991	30.01.1991	19.11.1991	293	112.500	1.444.948	383,96
	Phase II	1992	19.11.1991	13.01.1993	421	75.000	1.519.948
1993		13.01.1993	03.01.1994	355	57.000	1.576.948	160,56
1994		03.01.1994	04.01.1995	366	49.125	1.626.073	134,22
1995		04.01.1995	18.12.1995	348	36.126	1.662.199	103,81
1996		18.12.1995	02.02.1997	412	31.700	1.693.899	76,94
1997		02.02.1997	10.01.1998	342	27.307	1.721.206	79,85
1998		10.01.1998	05.01.1999	360	23.864	1.745.070	66,29
1999		05.01.1999	05.01.2000	365	41.569	1.786.639	113,89
2000		05.01.2000	05.01.2001	366	34.790	1.821.429	95,05
2001		05.01.2001	07.01.2002	367	37.440	1.858.869	102,02
2002		07.01.2002	09.01.2003	367	36.640	1.895.509	99,84
2003		09.01.2003	21.01.2004	377	41.011	1.936.520	108,78
2004*		21.01.2004	25.01.2005	370	66.541	2.003.061	179,84

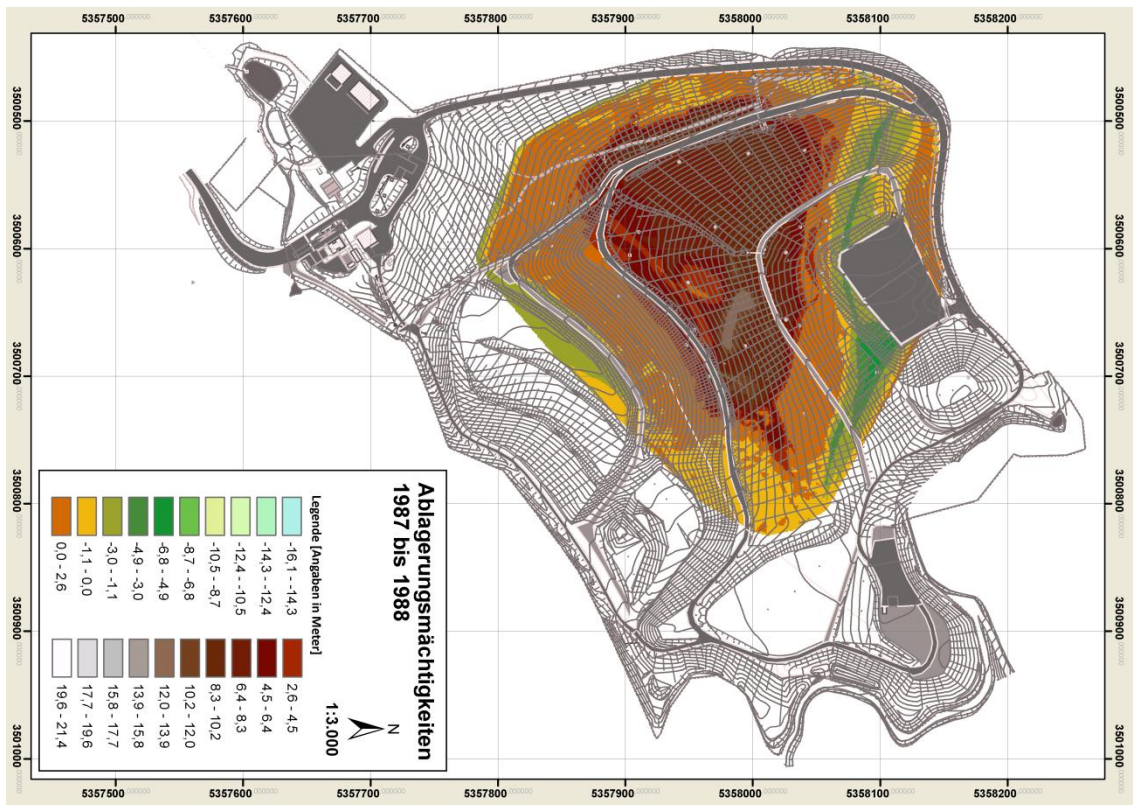
Merkmal	Einheit	Phase I	Phase II
Einbauzeit	[d]	3.366,00	4.816,00
Anteil an der Gesamteinbauzeit	[%]	41,14	58,86
Einbauvolumen	[m³ FM]	1.444.948,00	558.113,00
Anteil am Gesamteinbauvolumen	[%]	72,14	27,86
Mittleres tägliches Einbauvolumen	[m³ FM*d⁻¹]	427,74	115,33
Reduktionsfaktor Phase I zu Phase II	[%]		3,71



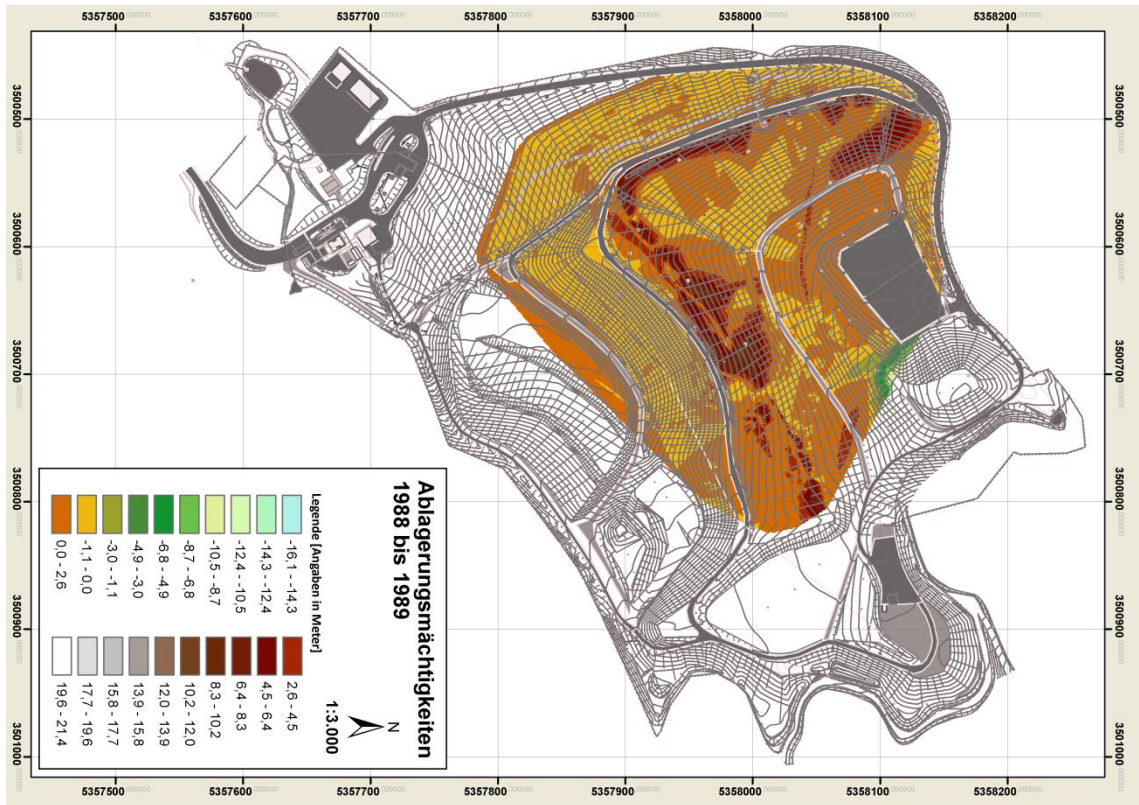
ANHANG 14: ÜBERSICHTSPLAN ZUR LOKALEN ABLAGERUNGSMÄCHTIGKEIT AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN FÜR DIE JAHRE 1982 – 1985



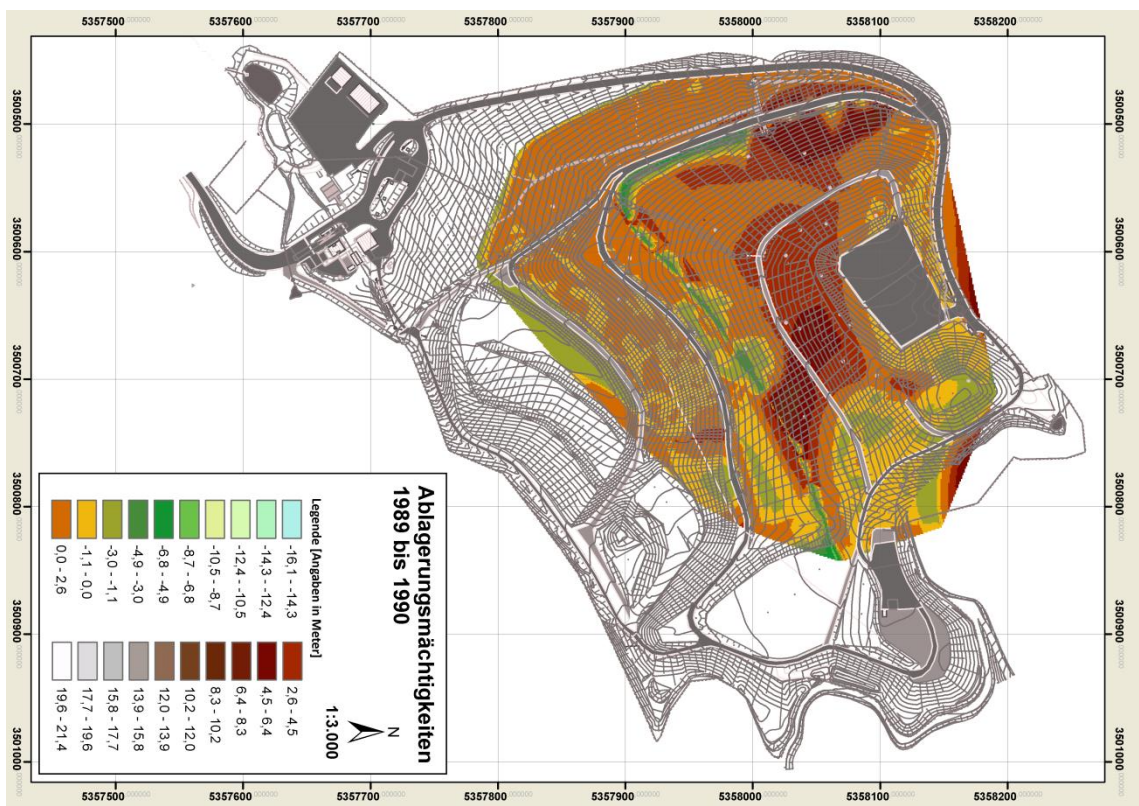
ANHANG 15: ÜBERSICHTSPLAN ZUR LOKALEN ABLAGERUNGSMÄCHTIGKEIT AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN FÜR DIE JAHRE 1985 – 1987



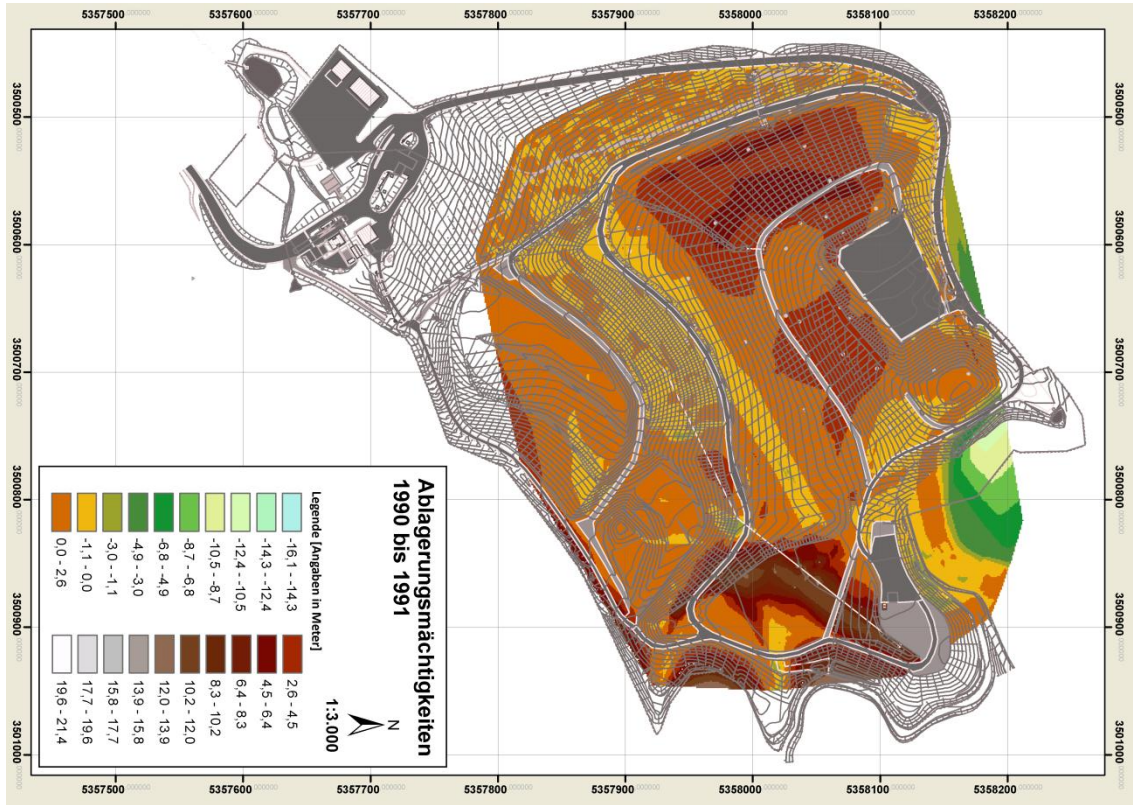
ANHANG 16: ÜBERSICHTSPLAN ZUR LOKALEN ABLAGERUNGSMÄCHTIGKEIT AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN FÜR DIE JAHRE 1987 – 1988



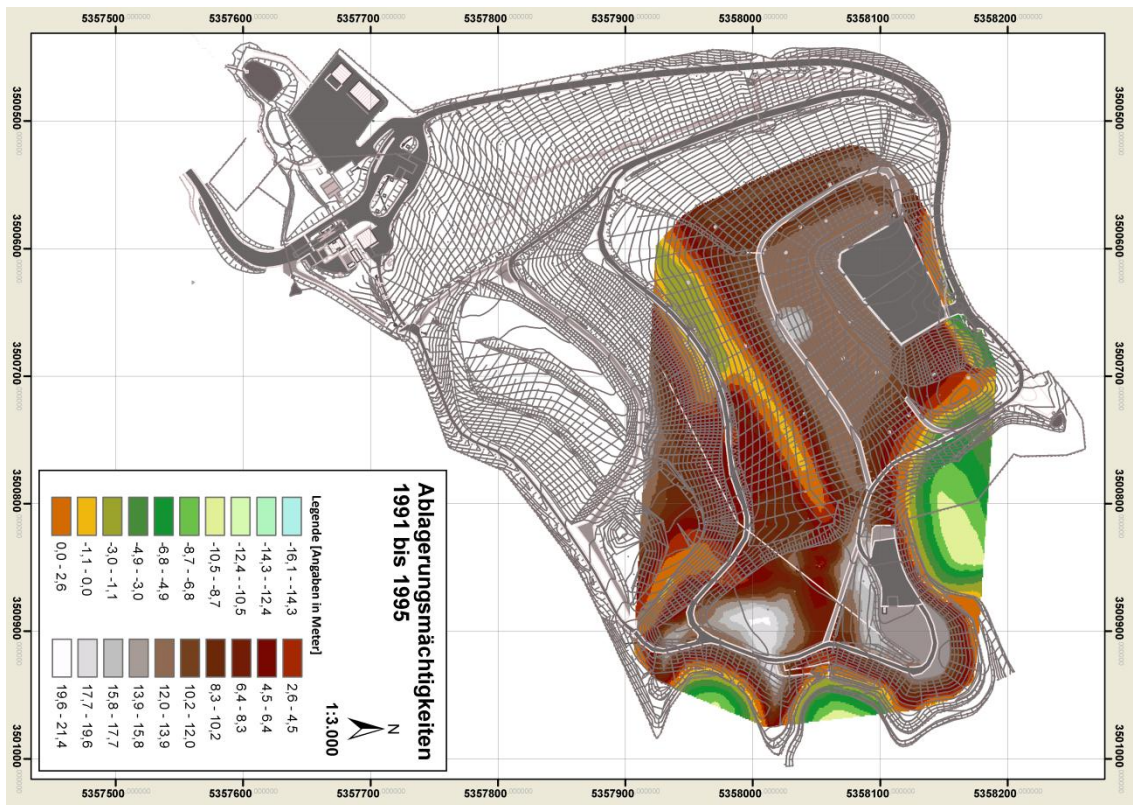
ANHANG 17: ÜBERSICHTSPLAN ZUR LOKALEN ABLAGERUNGSMÄCHTIGKEIT AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN FÜR DIE JAHRE 1988 – 1989



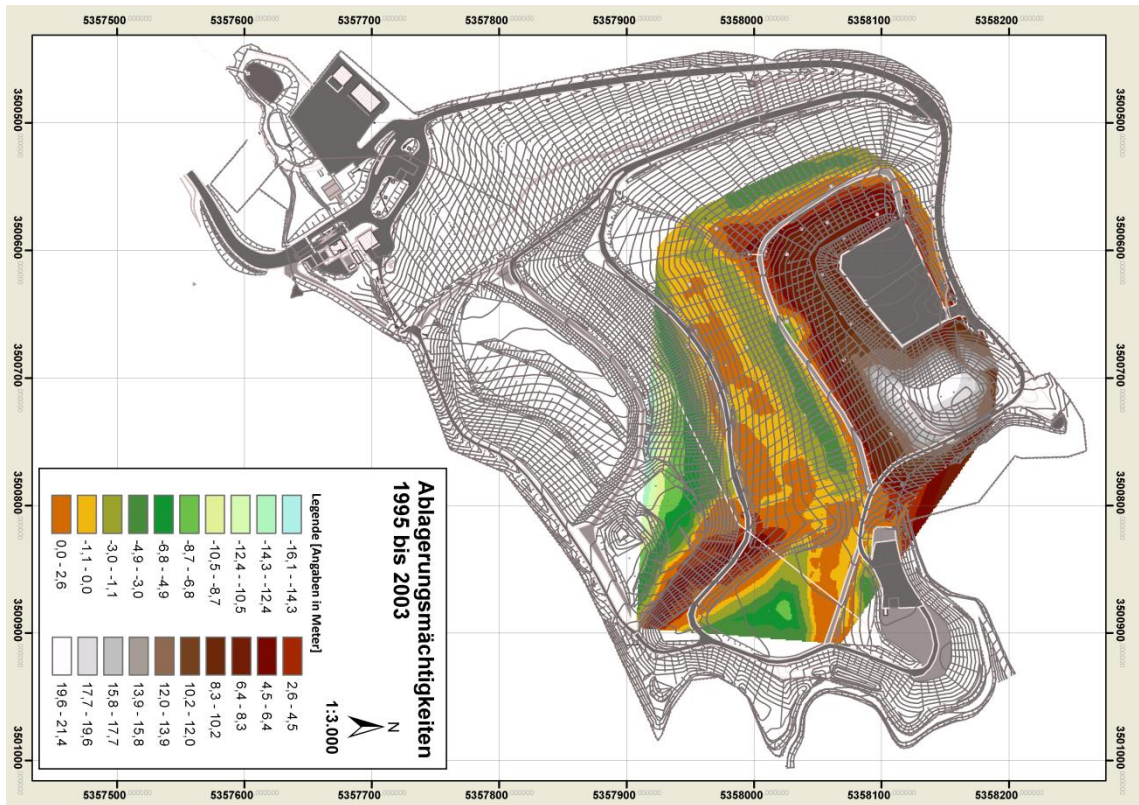
ANHANG 18: ÜBERSICHTSPLAN ZUR LOKALEN ABLAGERUNGSMÄCHTIGKEIT AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN FÜR DIE JAHRE 1989 – 1990



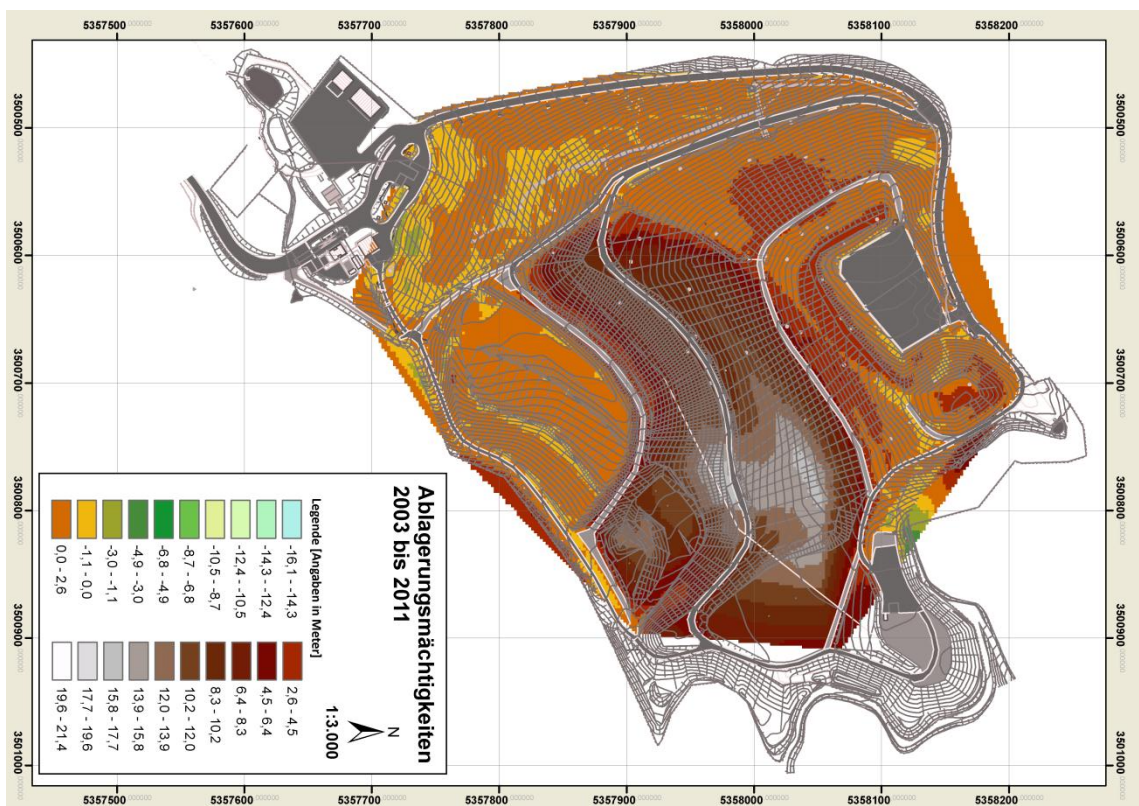
ANHANG 19: ÜBERSICHTSPLAN ZUR LOKALEN ABLAGERUNGSMÄCHTIGKEIT AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN FÜR DIE JAHRE 1990 – 1991



ANHANG 20: ÜBERSICHTSPLAN ZUR LOKALEN ABLAGERUNGSMÄCHTIGKEIT AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN FÜR DIE JAHRE 1991 – 1995

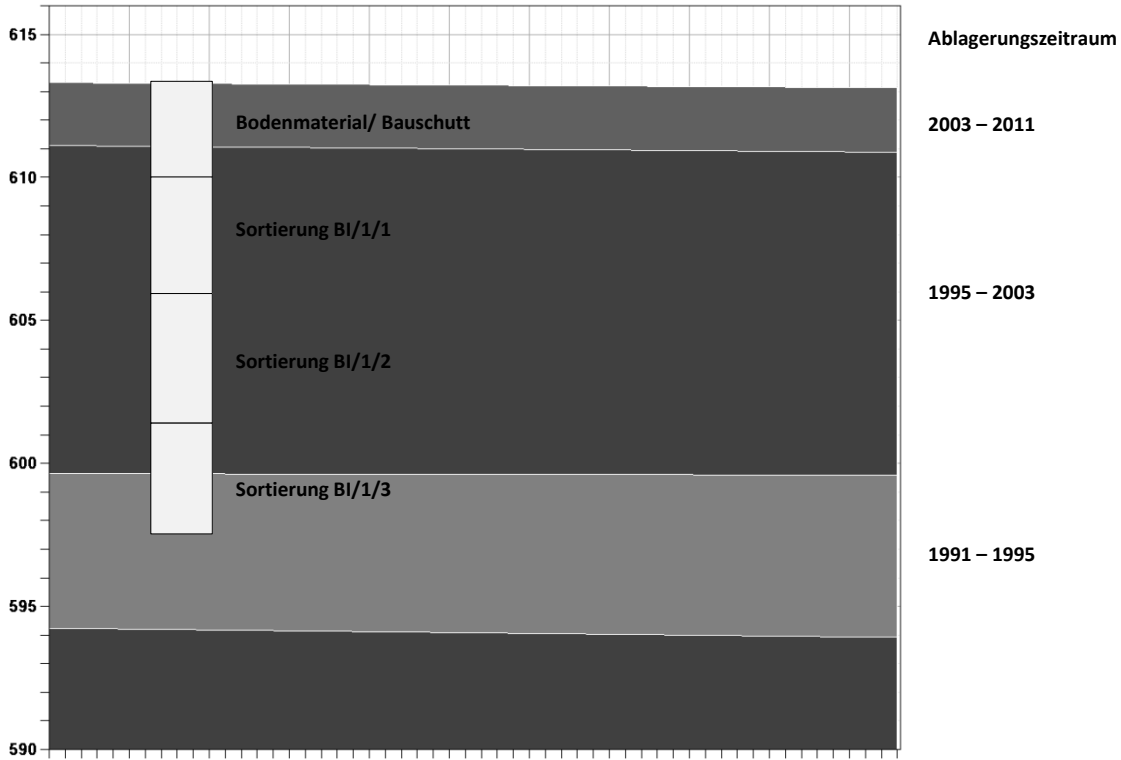


ANHANG 21: ÜBERSICHTSPLAN ZUR LOKALEN ABLAGERUNGSMÄCHTIGKEIT AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN FÜR DIE JAHRE 1995 – 2003



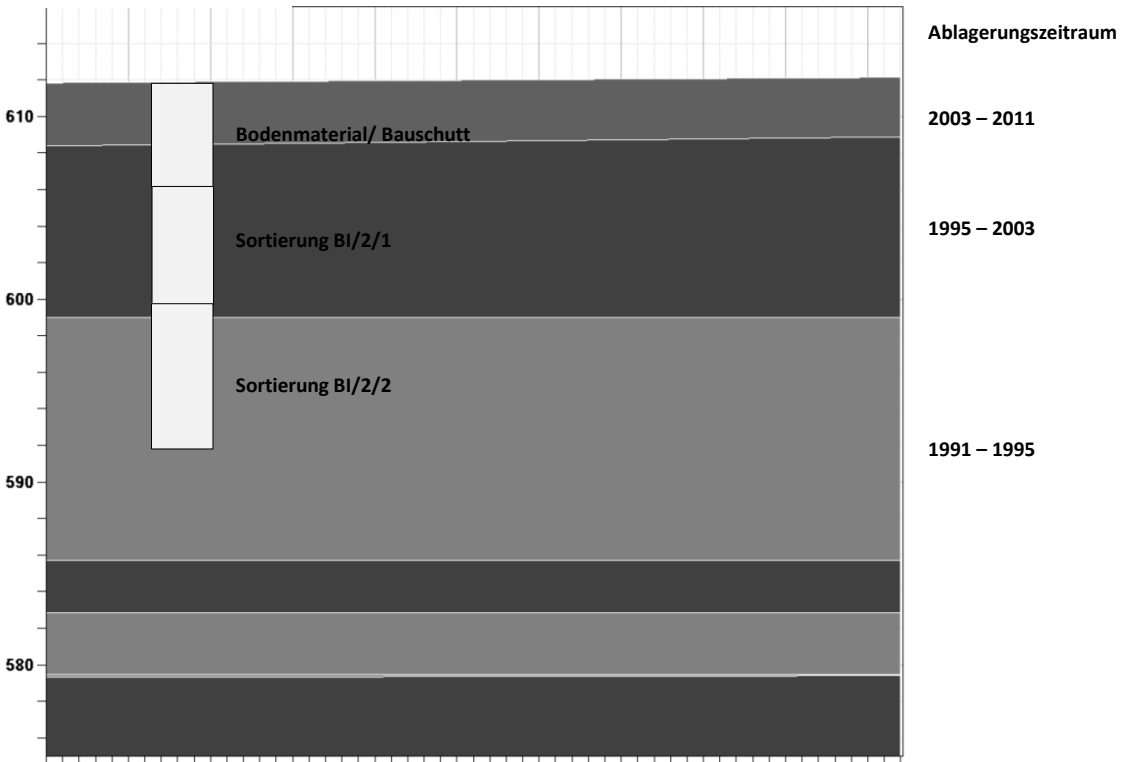
ANHANG 22: ÜBERSICHTSPLAN ZUR LOKALEN ABLAGERUNGSMÄCHTIGKEIT AUF DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN FÜR DIE JAHRE 2003 – 2011

[Meter über NN] – BI/1



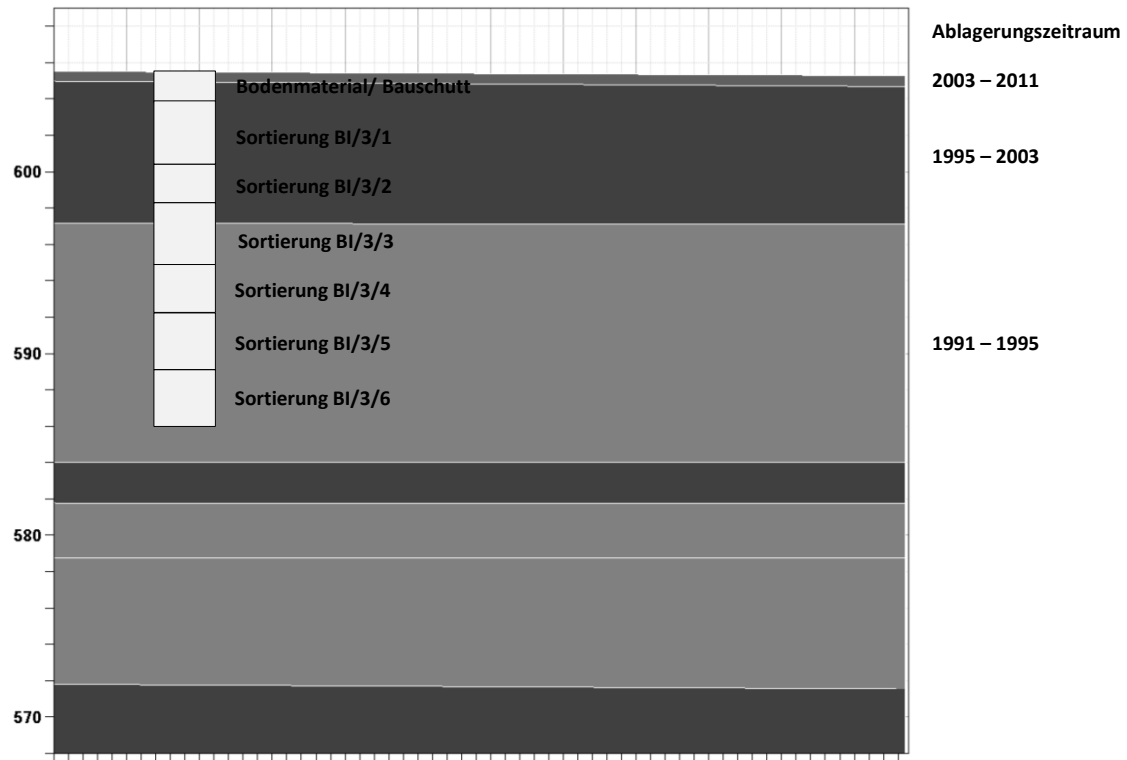
ANHANG 23: ERFASSTER TIEFENBEREICH UND ABLAGERUNGSZEITRAUM DES BOHRLOCHS BI/1 DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

[Meter über NN] – BI/2



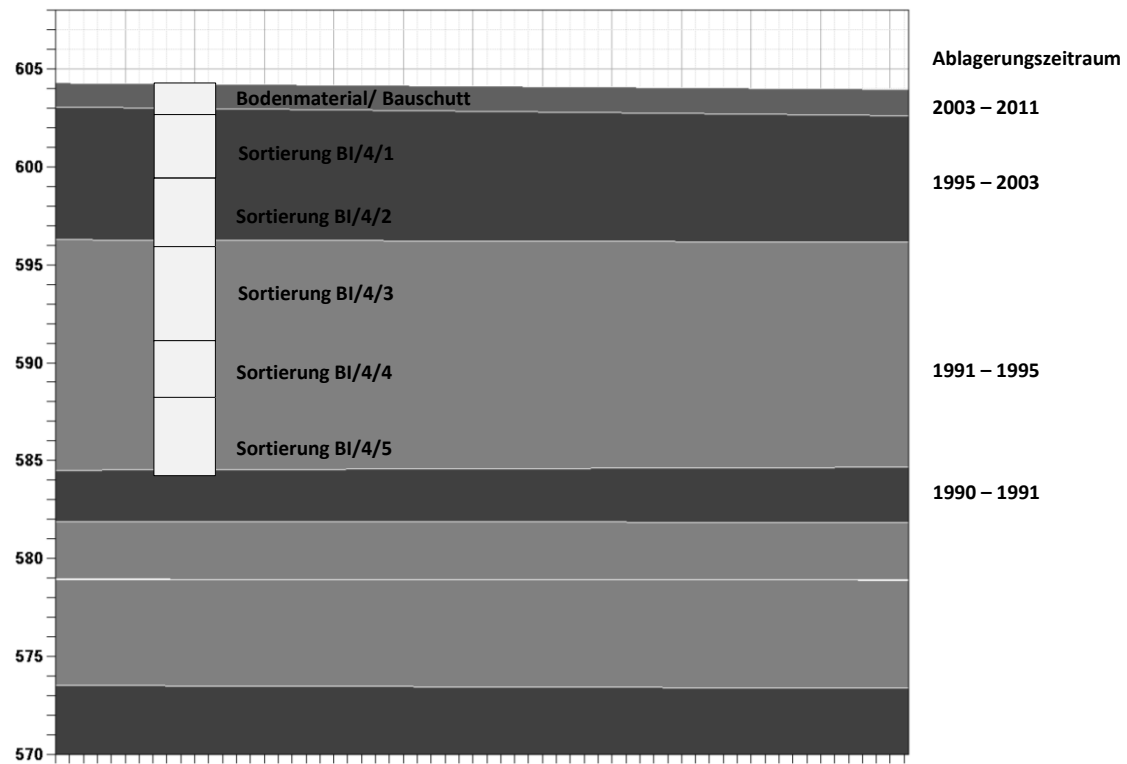
ANHANG 24: ERFASSTER TIEFENBEREICH UND ABLAGERUNGSZEITRAUM DES BOHRLOCHS BI/2 DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

[Meter über NN] – BI/3



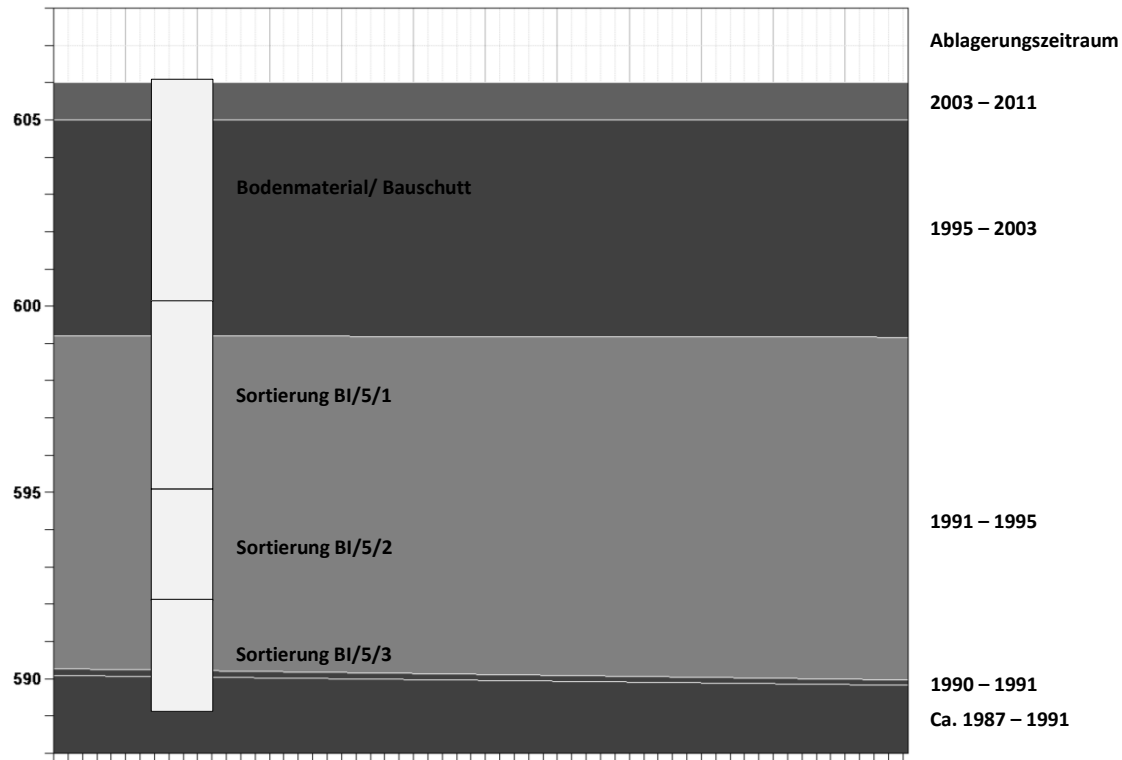
ANHANG 25: ERFASSTER TIEFENBEREICH UND ABLAGERUNGSZEITRAUM DES BOHRLOCHS BI/3 DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

[Meter über NN] – BI/4



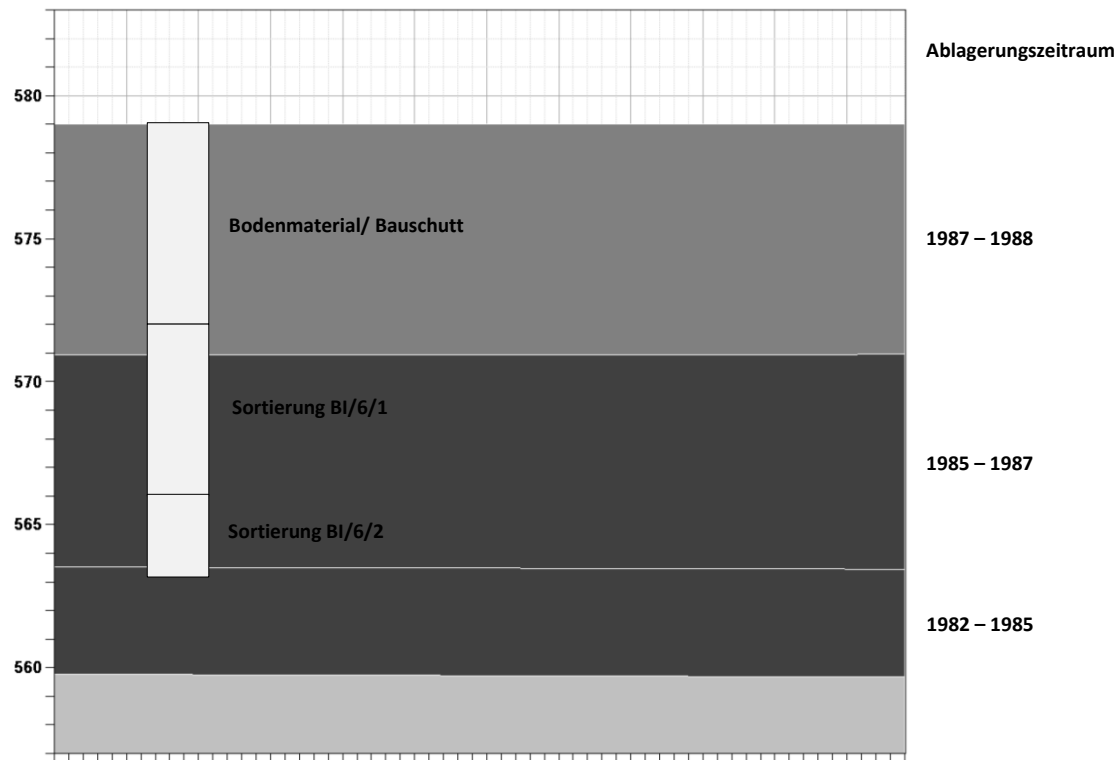
ANHANG 26: ERFASSTER TIEFENBEREICH UND ABLAGERUNGSZEITRAUM DES BOHRLOCHS BI/4 DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

[Meter über NN] – BI/5



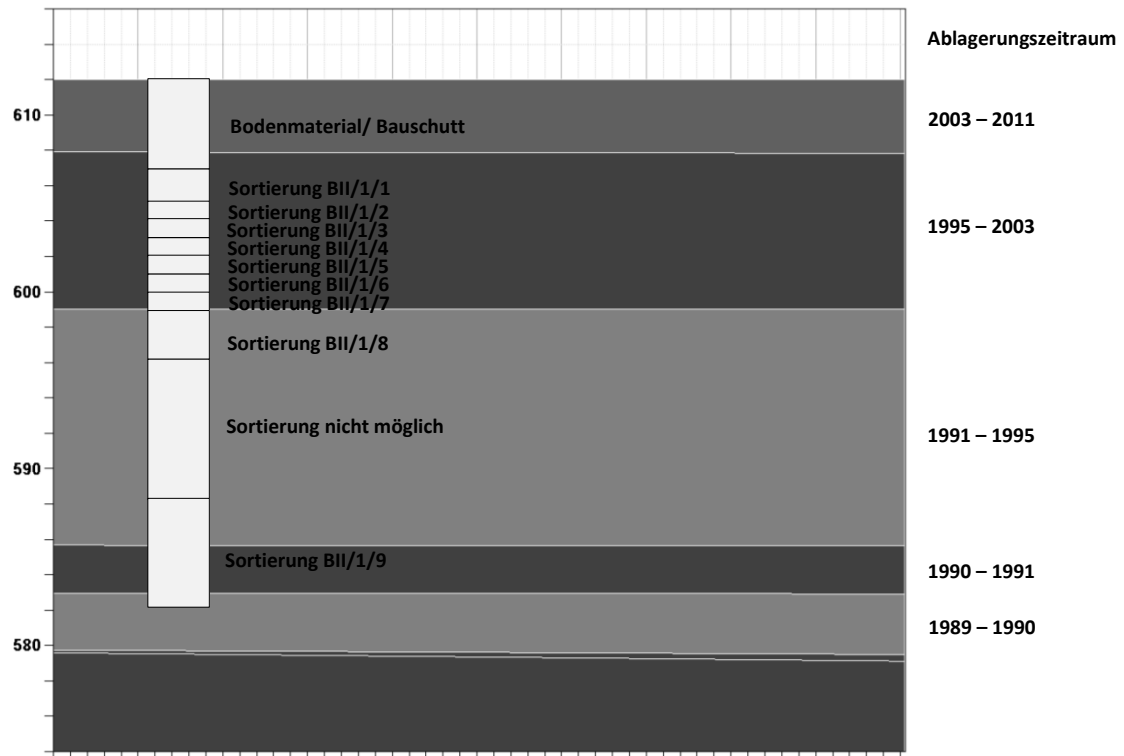
ANHANG 27: ERFASSTER TIEFENBEREICH UND ABLAGERUNGSZEITRAUM DES BOHRLOCHS BI/5 DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

[Meter über NN] – BI/6



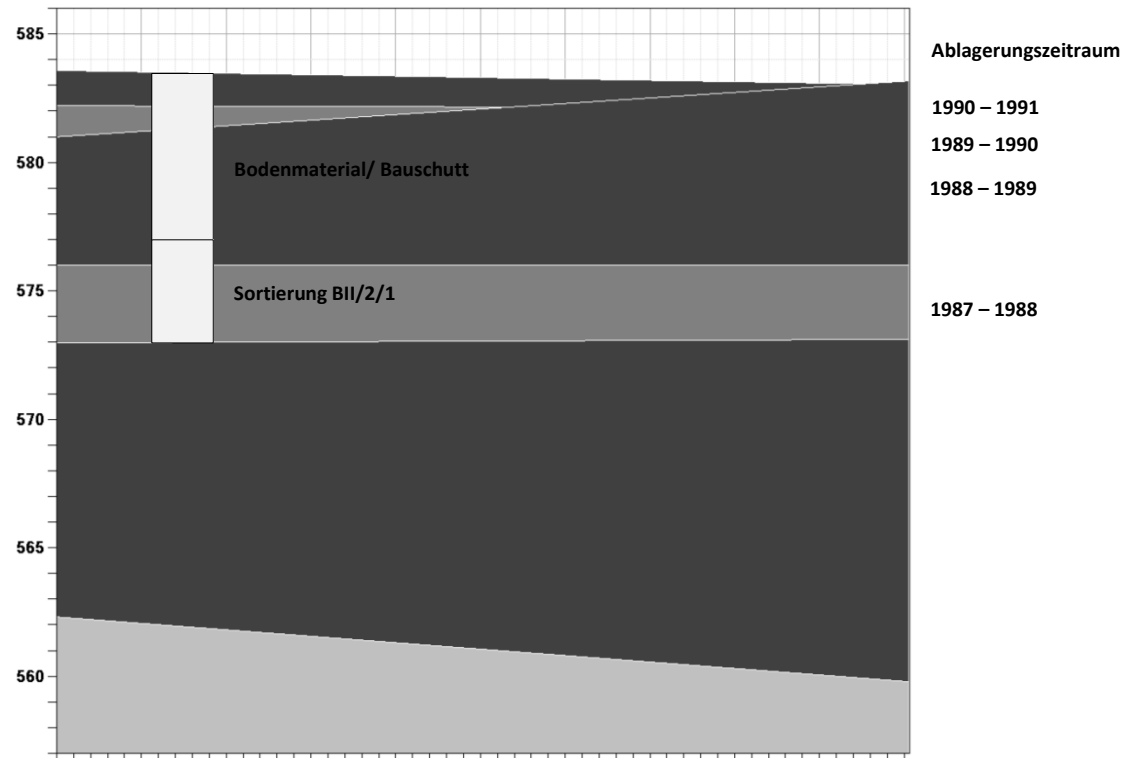
ANHANG 28: ERFASSTER TIEFENBEREICH UND ABLAGERUNGSZEITRAUM DES BOHRLOCHS BI/6 DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

[Meter über NN] – BII/1



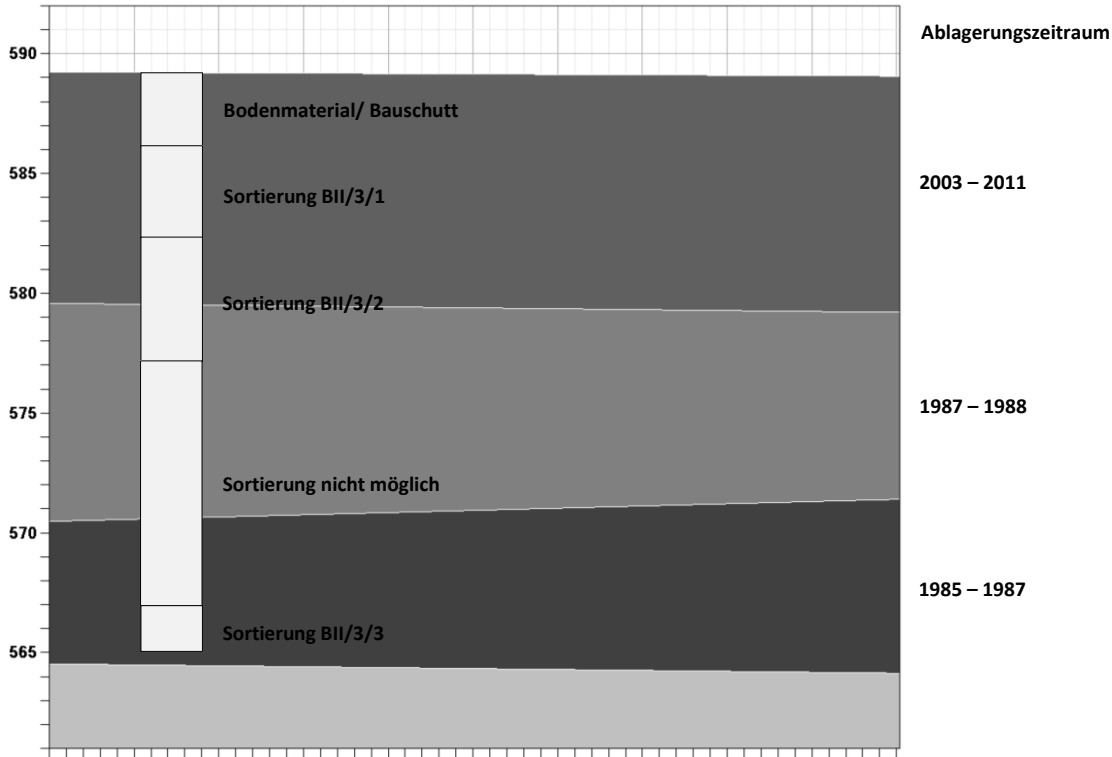
ANHANG 29: ERFASSTER TIEFENBEREICH UND ABLAGERUNGSZEITRAUM DES BOHRLOCHS BII/1 DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

[Meter über NN] – BII/2

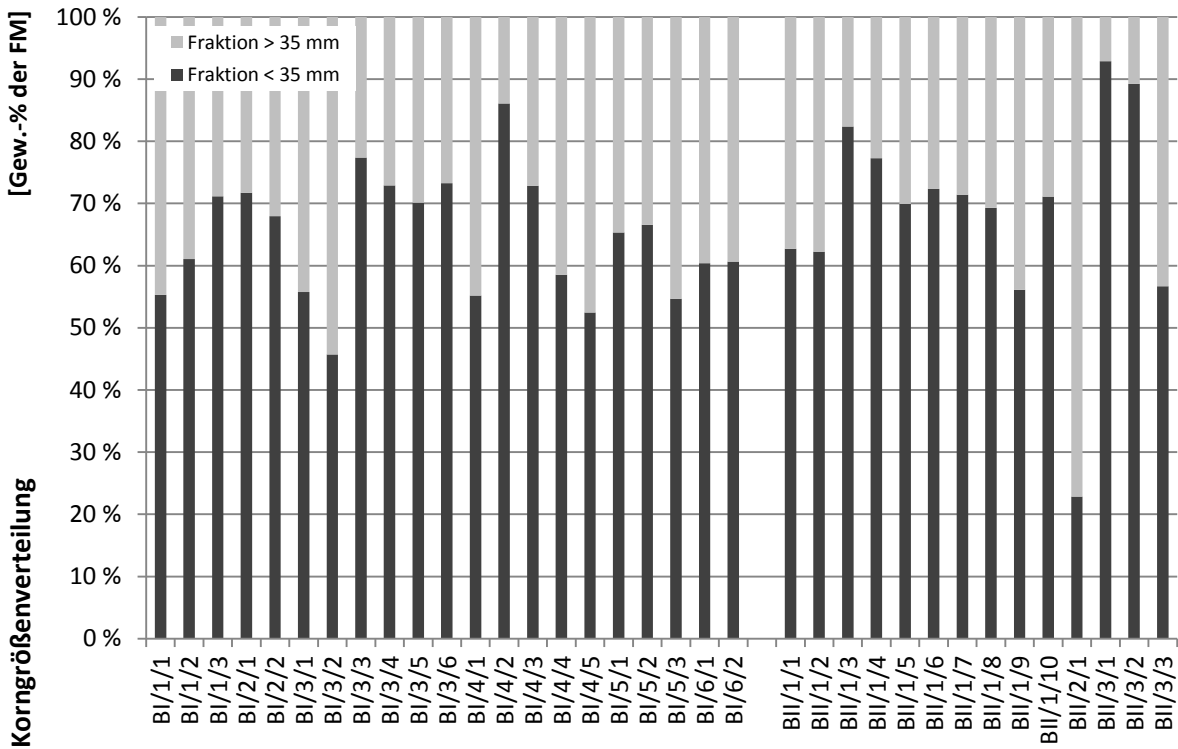


ANHANG 30: ERFASSTER TIEFENBEREICH UND ABLAGERUNGSZEITRAUM DES BOHRLOCHS BII/2 DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

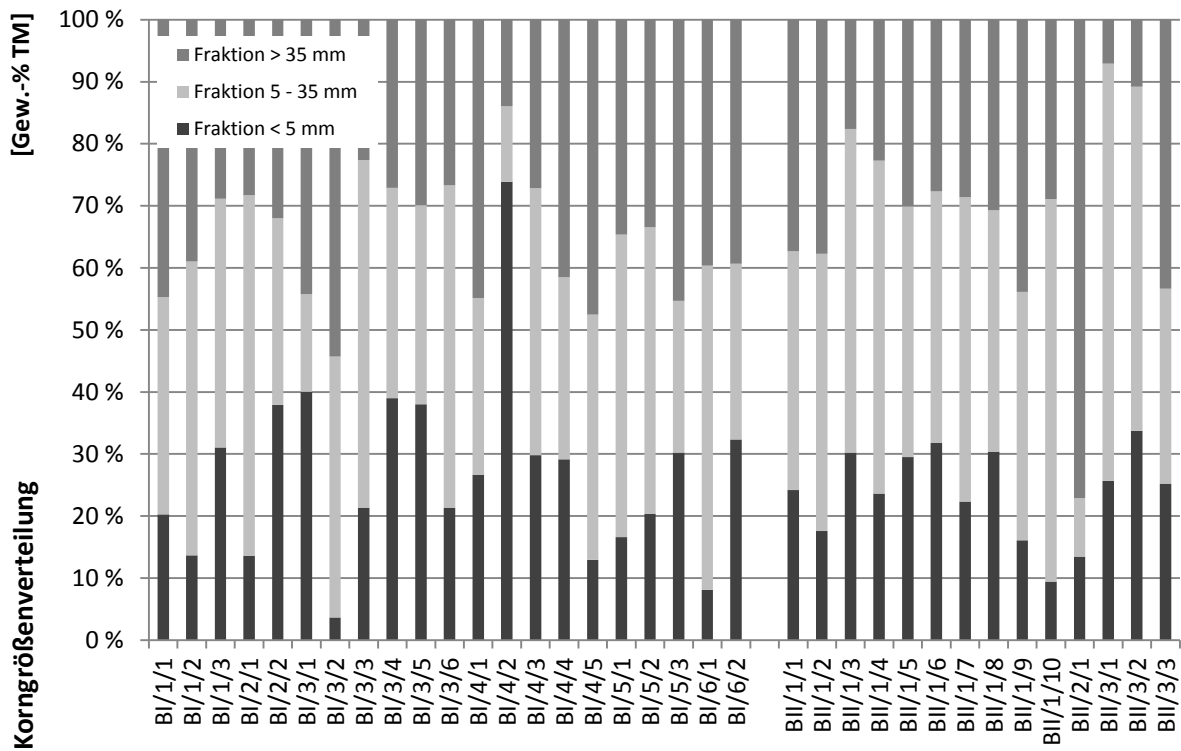
[Meter über NN] – BII/3



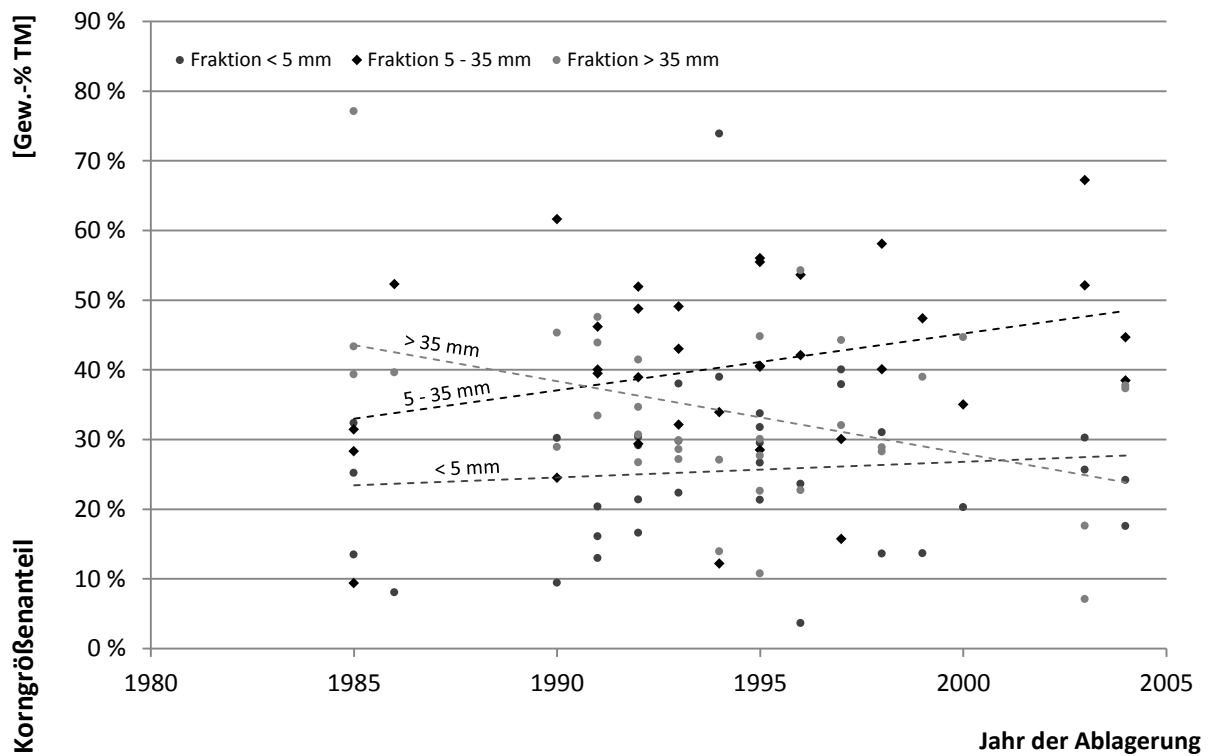
ANHANG 31: ERFASSTER TIEFENBEREICH UND ABLAGERUNGSZEITRAUM DES BOHRLOCHS BII/3 DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN



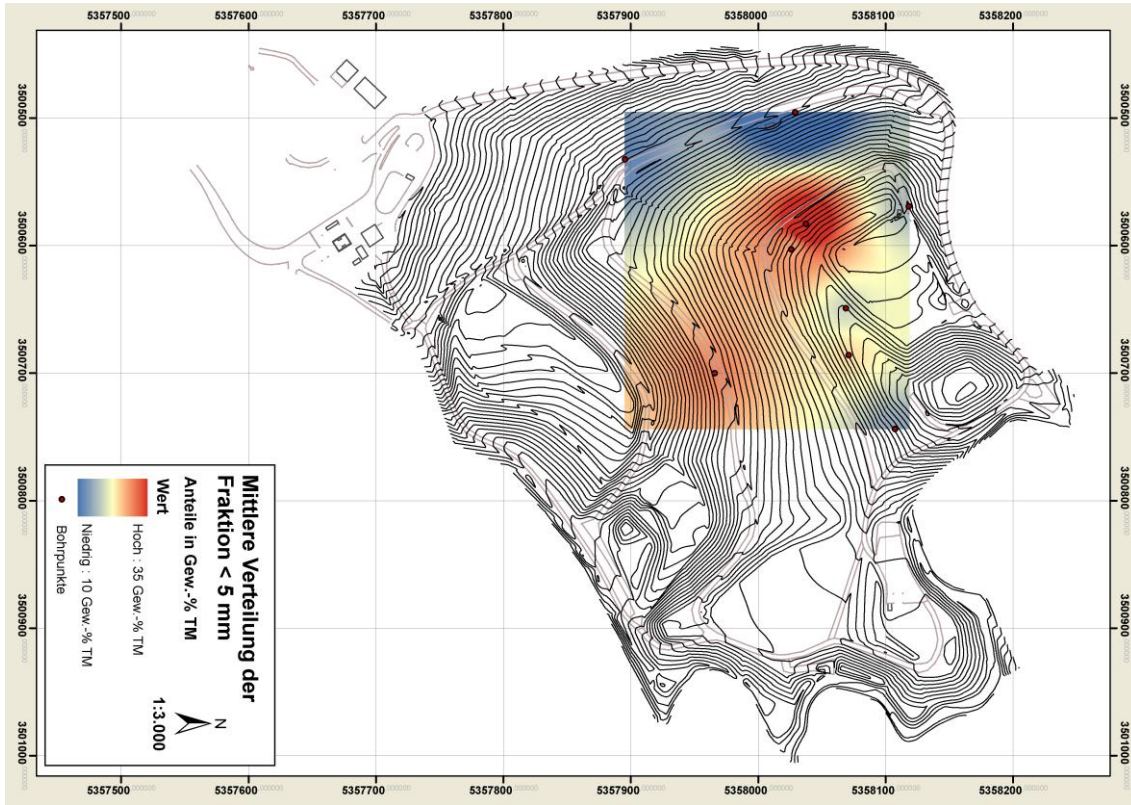
ANHANG 32: SPEZIFISCHE KORNGRÖßENVERTEILUNG DER EINZELNEN DEPONIEGUTCHARGEN FÜR DIE BOHRSTAFFEL I (BI) UND DIE BOHRSTAFFEL II (BII) UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER FM



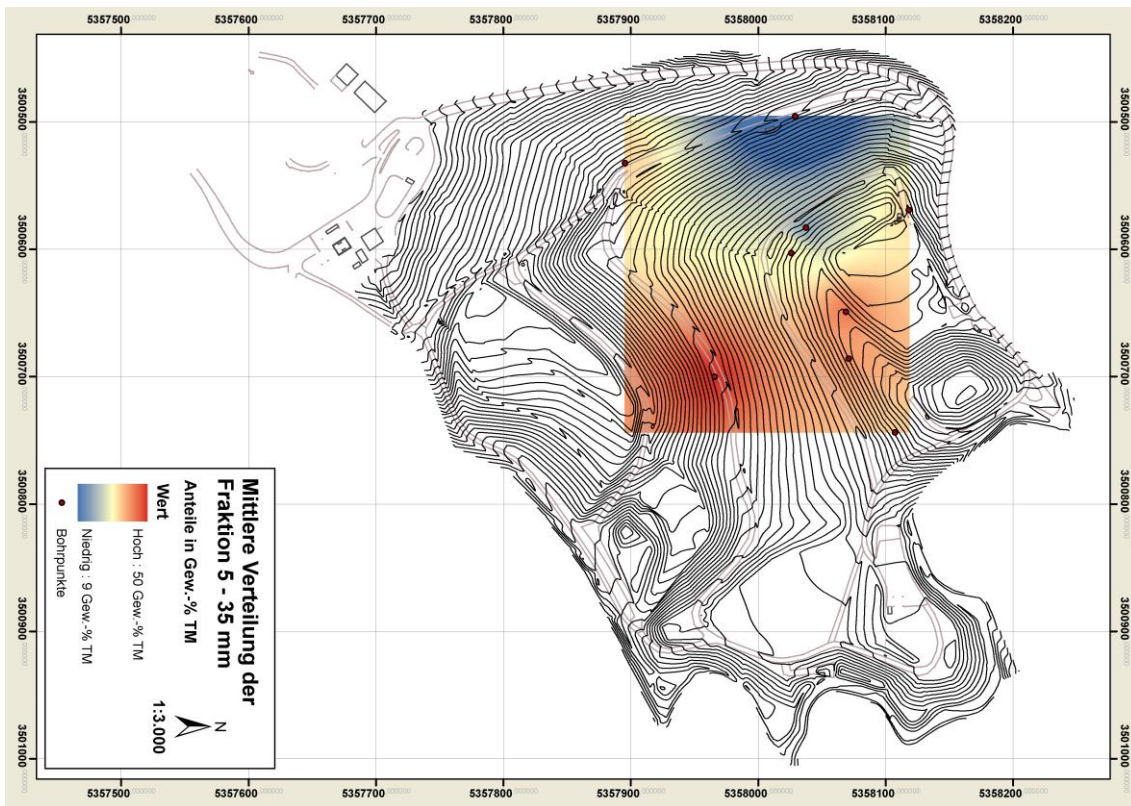
ANHANG 33: SPEZIFISCHE KORNGRÖßENVERTEILUNG DER EINZELNEN DEPONIEGUTCHARGEN FÜR DIE BOHRSTAFFEL I (BI) UND DIE BOHRSTAFFEL II (BII) UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER TM



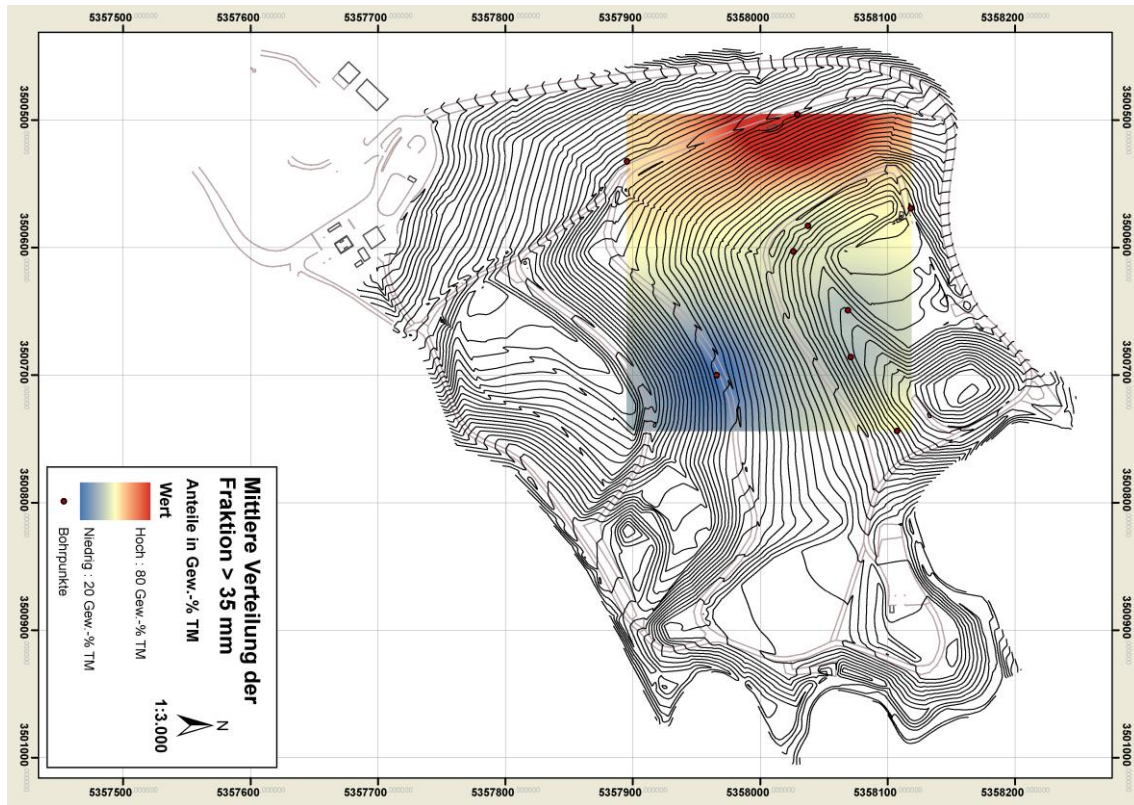
ANHANG 34: KORNGRÖßENANTEILE DER FRAKTIONEN < 5 MM, 5 – 35 MM UND > 35 MM IN ABHÄNGIGKEIT DES ABLAGERUNGSLALTERS



ANHANG 35: RÄUMLICHE VERTEILUNG DER MITTLEREN KORNGRÖßENANTEILE DER FRAKTION < 5 MM UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER TM

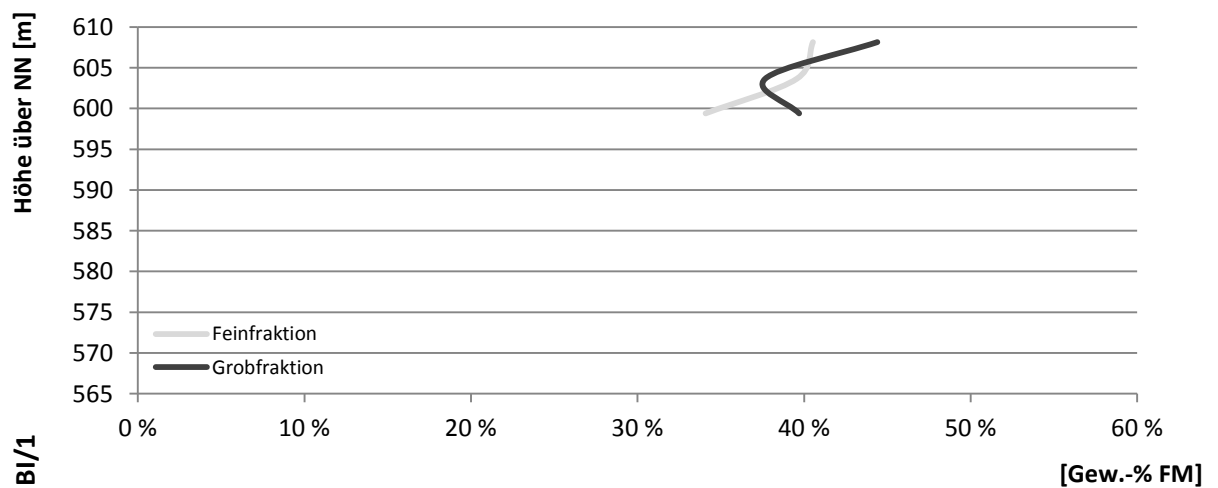


ANHANG 36: RÄUMLICHE VERTEILUNG DER MITTLEREN KORNGRÖßENANTEILE DER FRAKTION 5 – 35 MM UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER TM

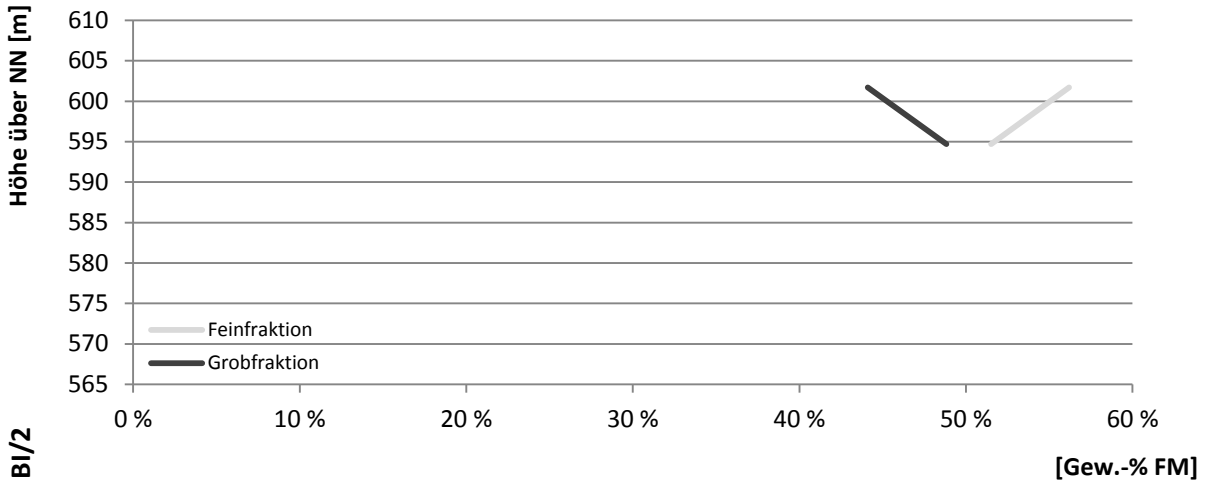


ANHANG 37: RÄUMLICHE VERTEILUNG DER MITTLEREN KORNGRÖßENANTEILE DER FRAKTION > 35 MM UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER TM

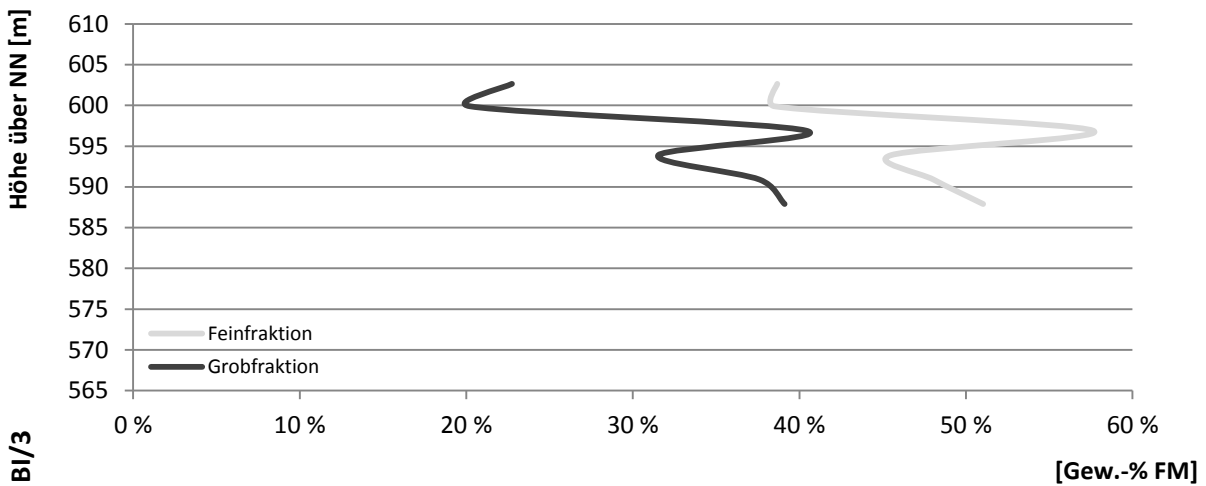
WASSERGEHALT



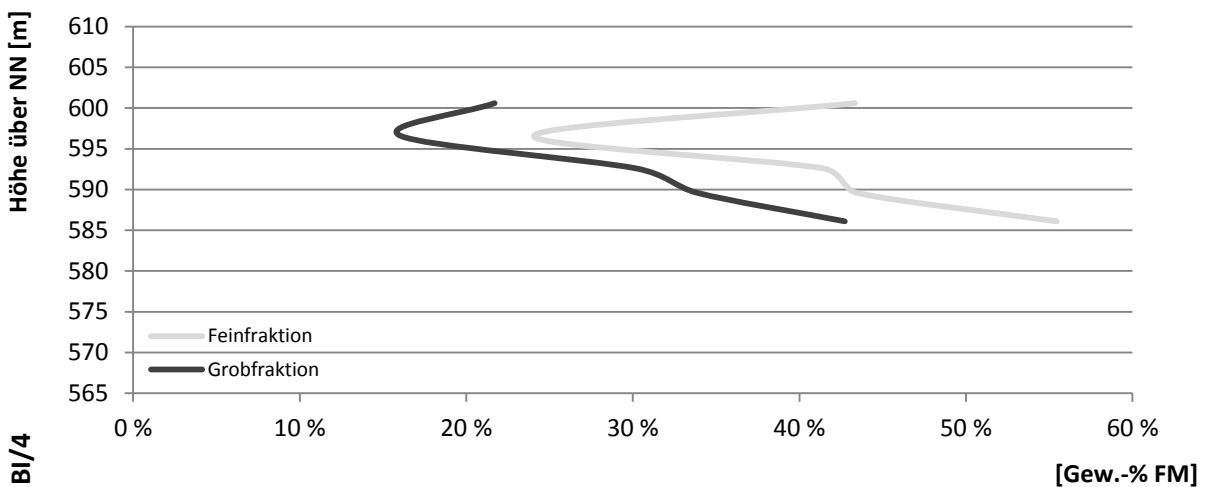
ANHANG 38: TIEFENPROFIL DES WASSERGEHALTS | BI/1 DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN



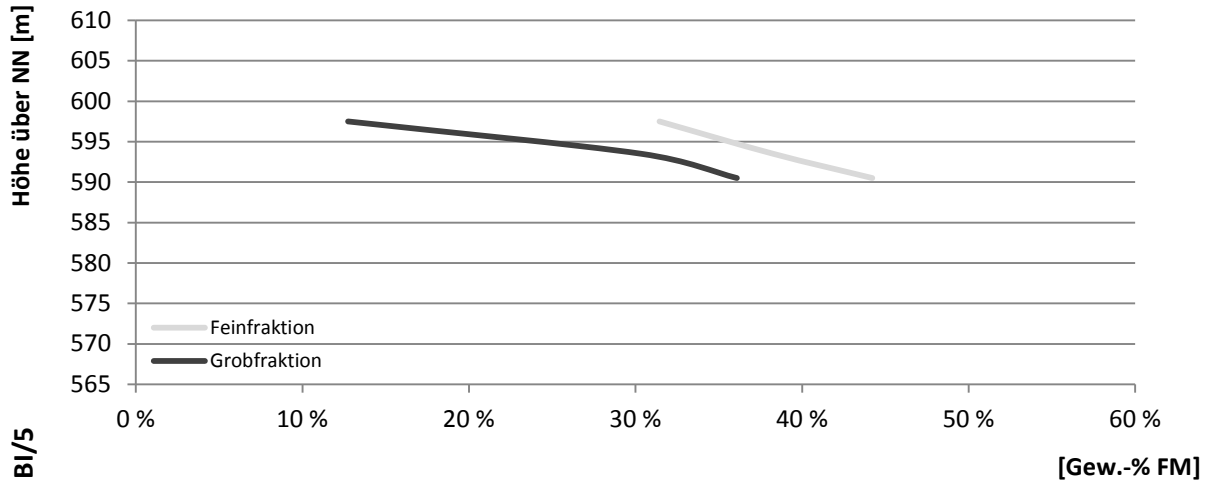
ANHANG 39: TIEFENPROFIL DES WASSERGEHALTS | BI/2 DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN



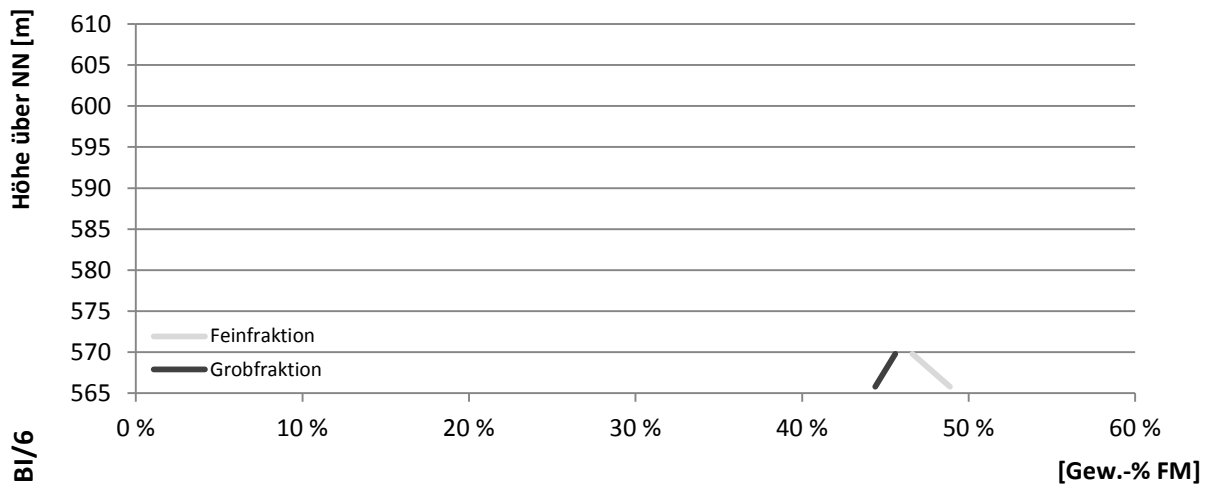
ANHANG 40: TIEFENPROFIL DES WASSERGEHALTS | BI/3 DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN



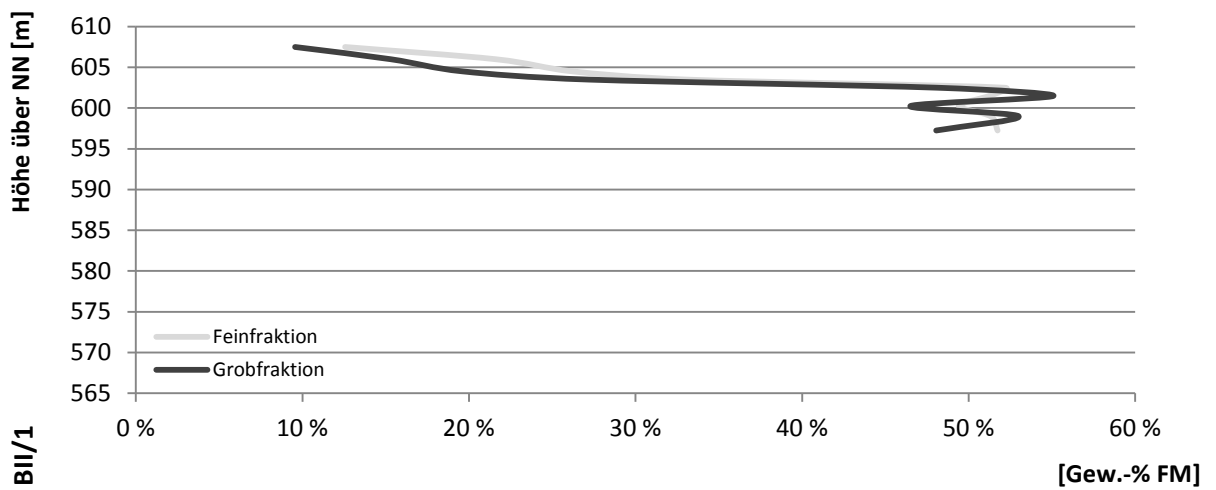
ANHANG 41: TIEFENPROFIL DES WASSERGEHALTS | BI/4 DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN



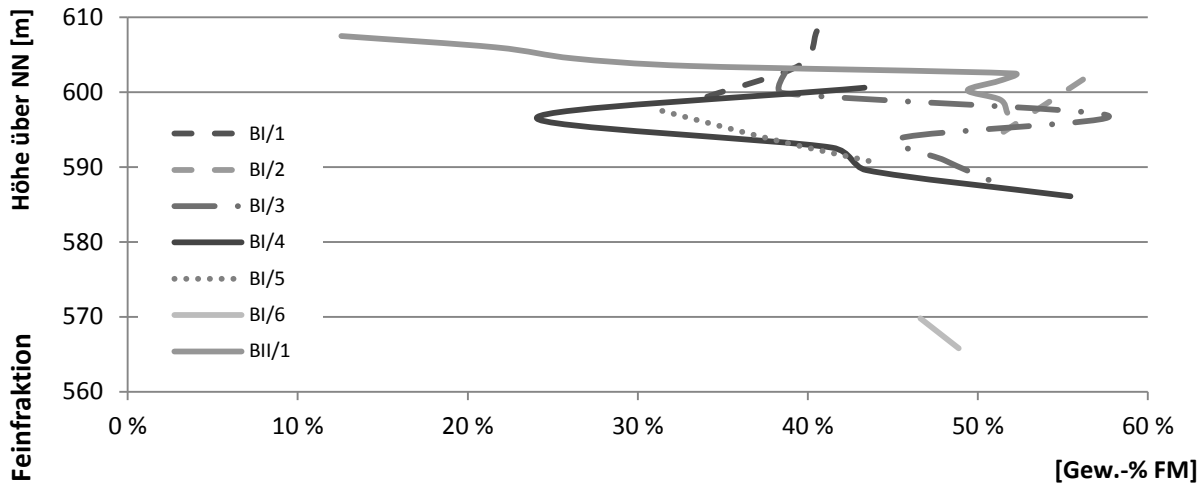
ANHANG 42: TIEFENPROFIL DES WASSERGEHALTS | BI/5 DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN



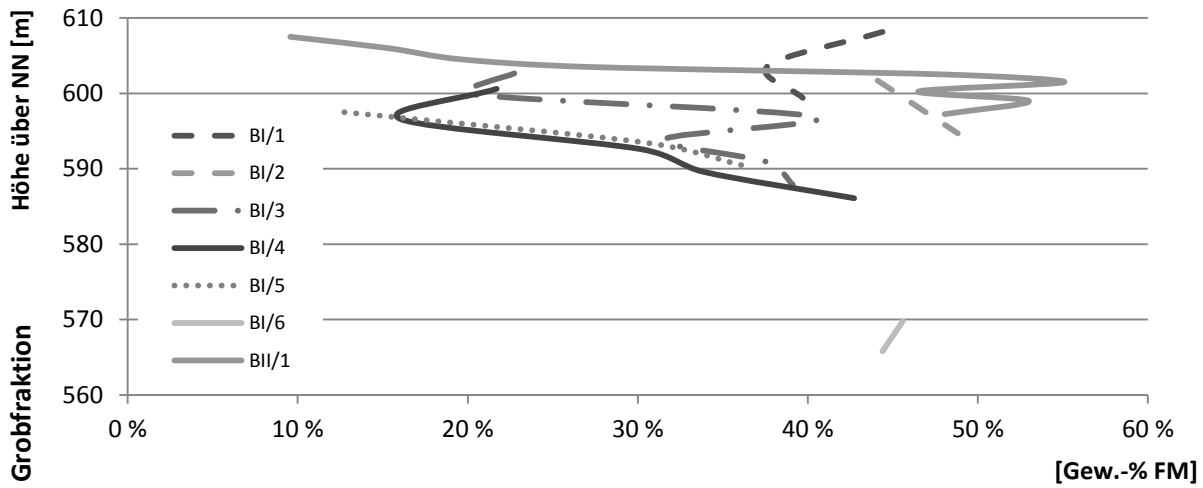
ANHANG 43: TIEFENPROFIL DES WASSERGEHALTS | BI/6 DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN



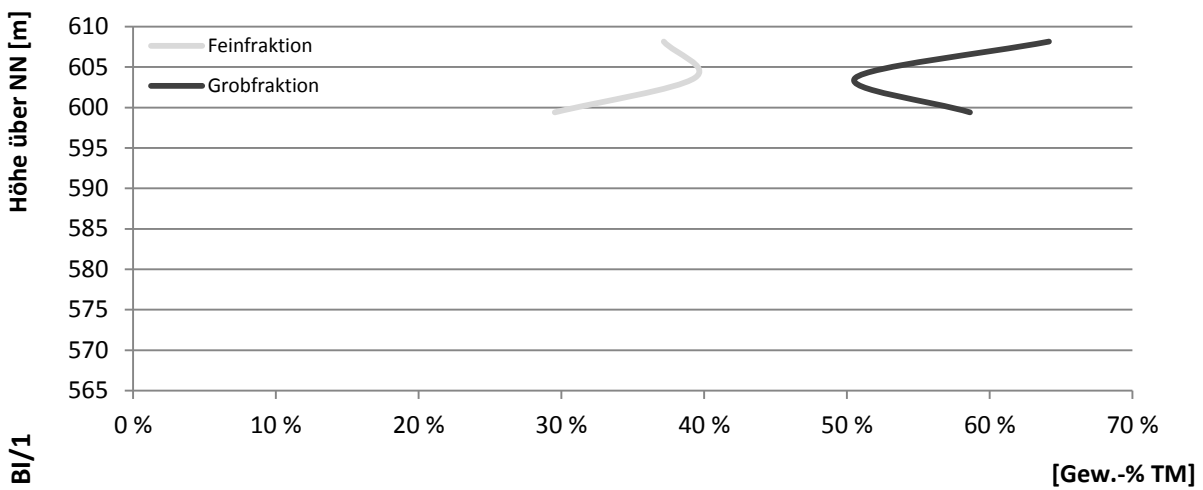
ANHANG 44: TIEFENPROFIL DES WASSERGEHALTS | BII/1 DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN



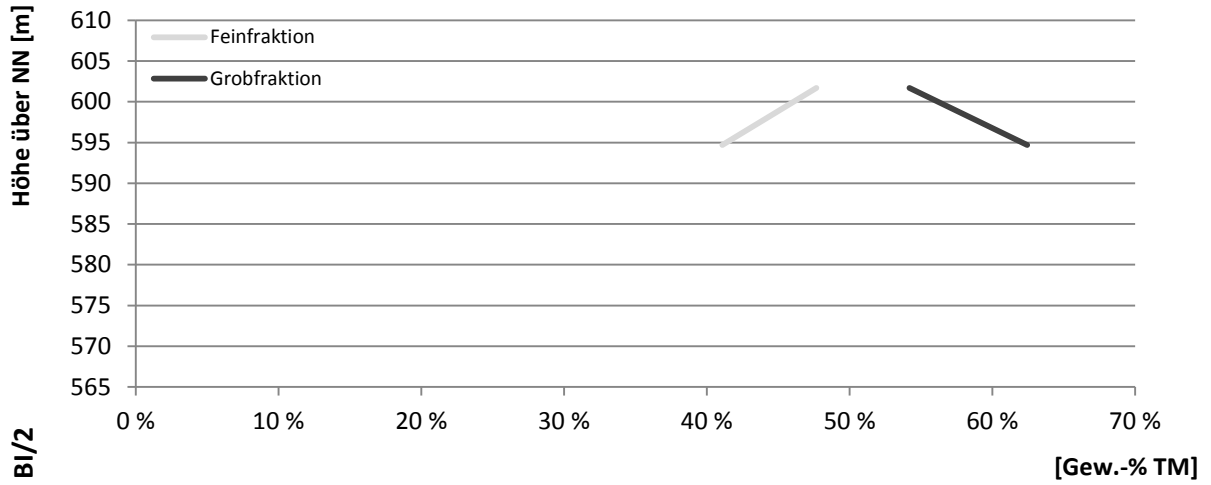
ANHANG 45: ZUSAMMENFASSENDES TIEFENPROFIL DES WASSERGEHALTS | FEINFRAKTION DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN



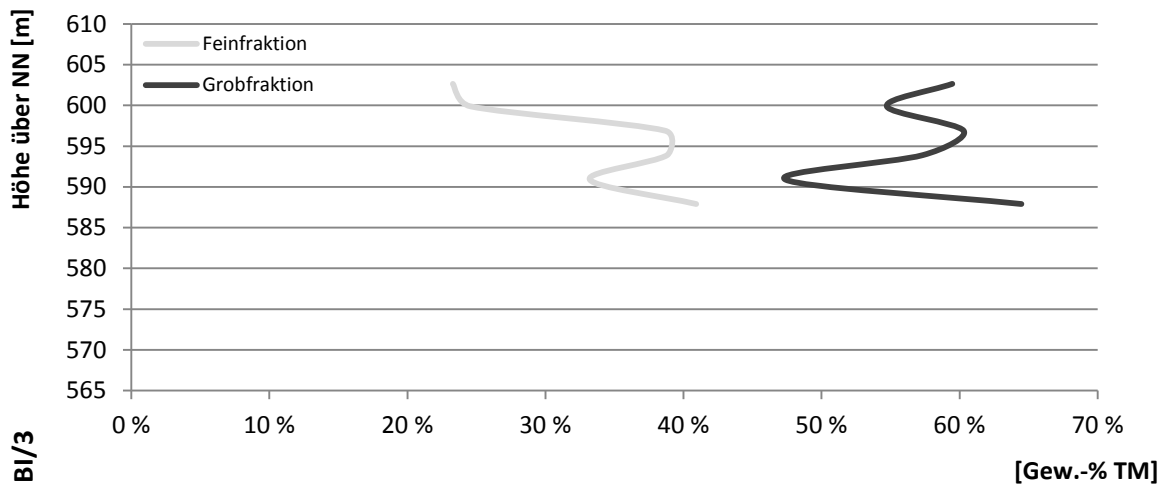
ANHANG 46: ZUSAMMENFASSENDES TIEFENPROFIL DES WASSERGEHALTS | GROBFRAKTION DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN



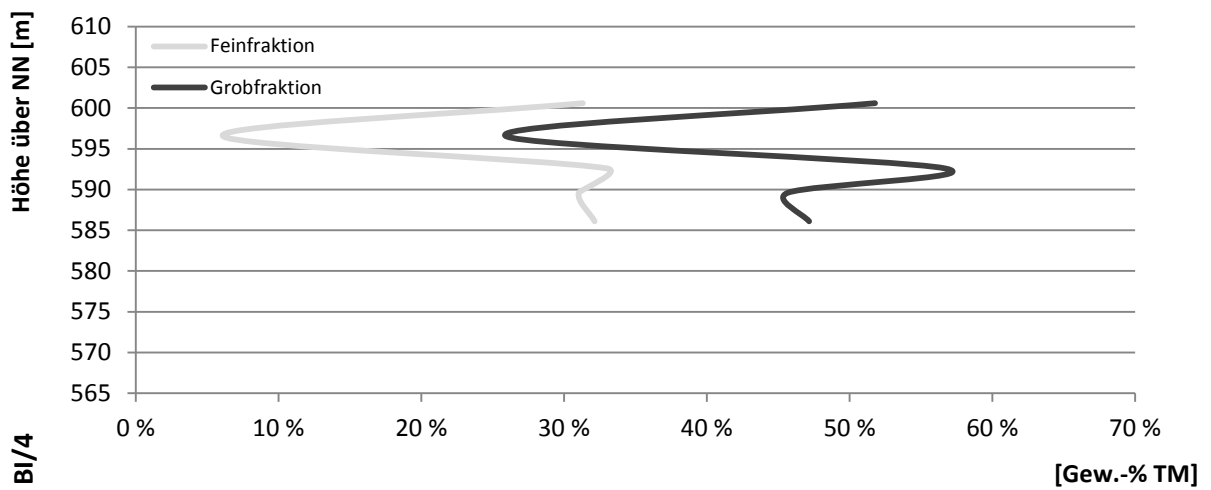
ANHANG 47: TIEFENPROFIL DES GLÜHVERLUSTES | BI/1 DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN



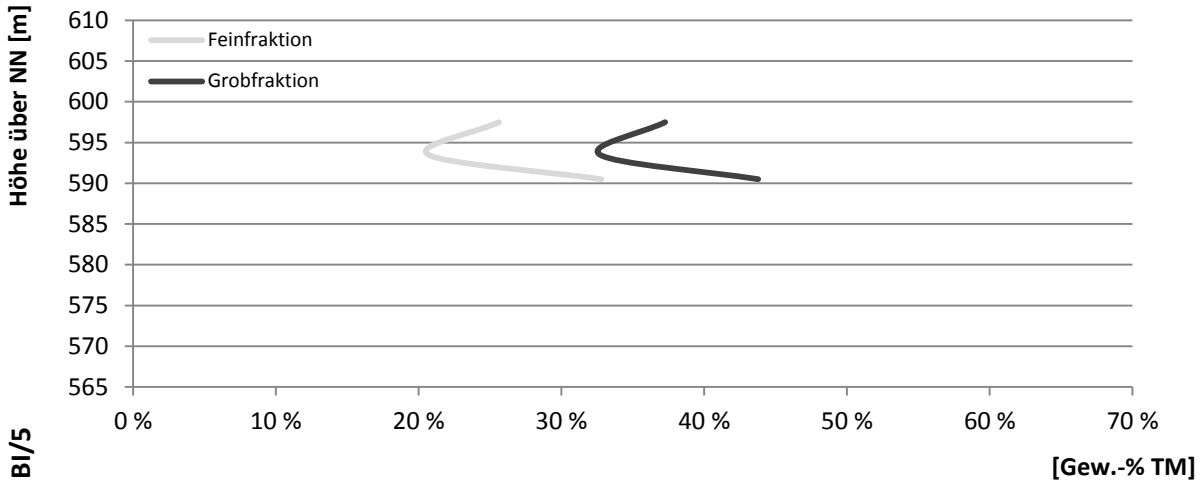
ANHANG 48: TIEFENPROFIL DES GLÜHVERLUSTES | BI/2 DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN



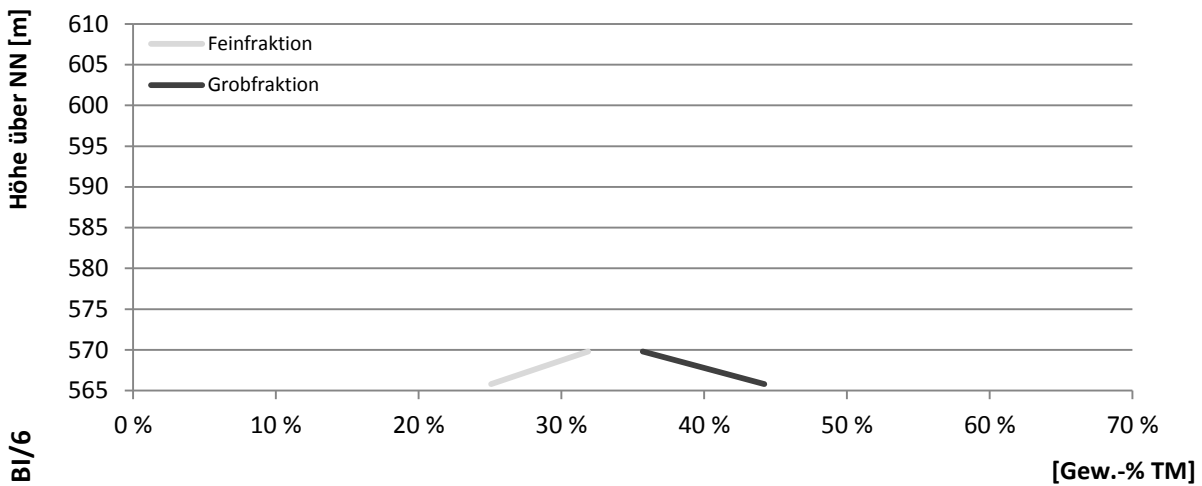
ANHANG 49: TIEFENPROFIL DES GLÜHVERLUSTES | BI/3 DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN



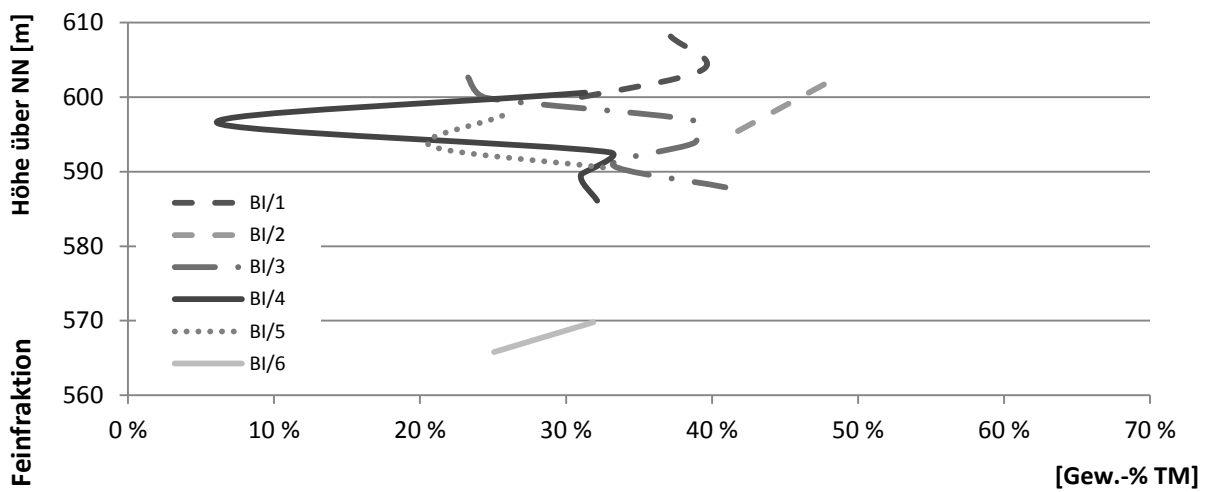
ANHANG 50: TIEFENPROFIL DES GLÜHVERLUSTES | BI/4 DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN



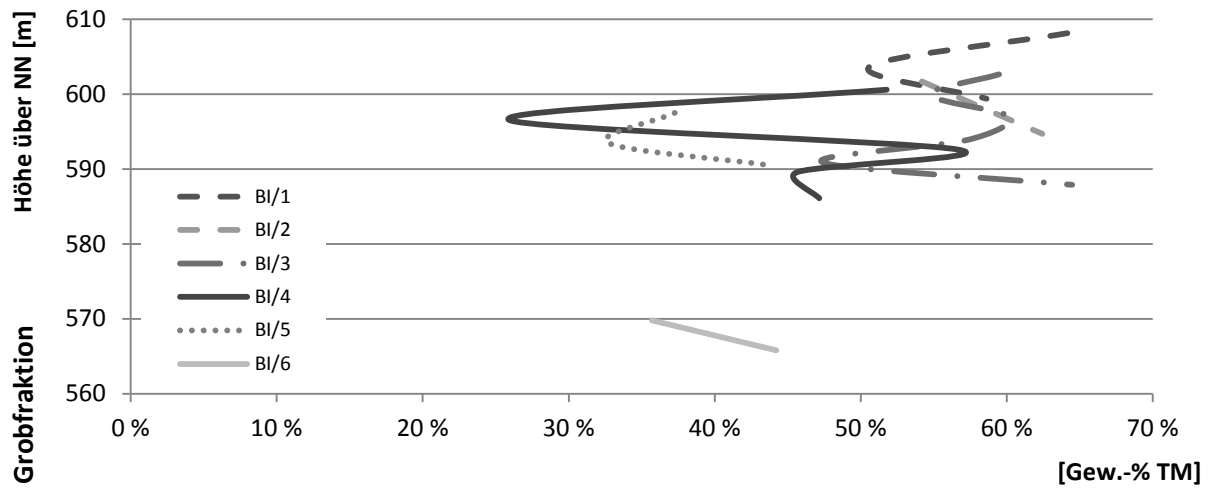
ANHANG 51: TIEFENPROFIL DES GLÜHVERLUSTES | BI/5 DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN



ANHANG 52: TIEFENPROFIL DES GLÜHVERLUSTES | BI/6 DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN



ANHANG 53: ZUSAMMENFASSENDES TIEFENPROFIL DES GLÜHVERLUSTES | FEINFRAKTION DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN



ANHANG 54: ZUSAMMENFASSENDES TIEFENPROFIL DES GLÜHVERLUSTES | GROBFRAKTION DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN

ANHANG 55: MODELLIERUNG DER DEPONIEGASPRODUKTION | ZEITRAUM 1982 - 2050

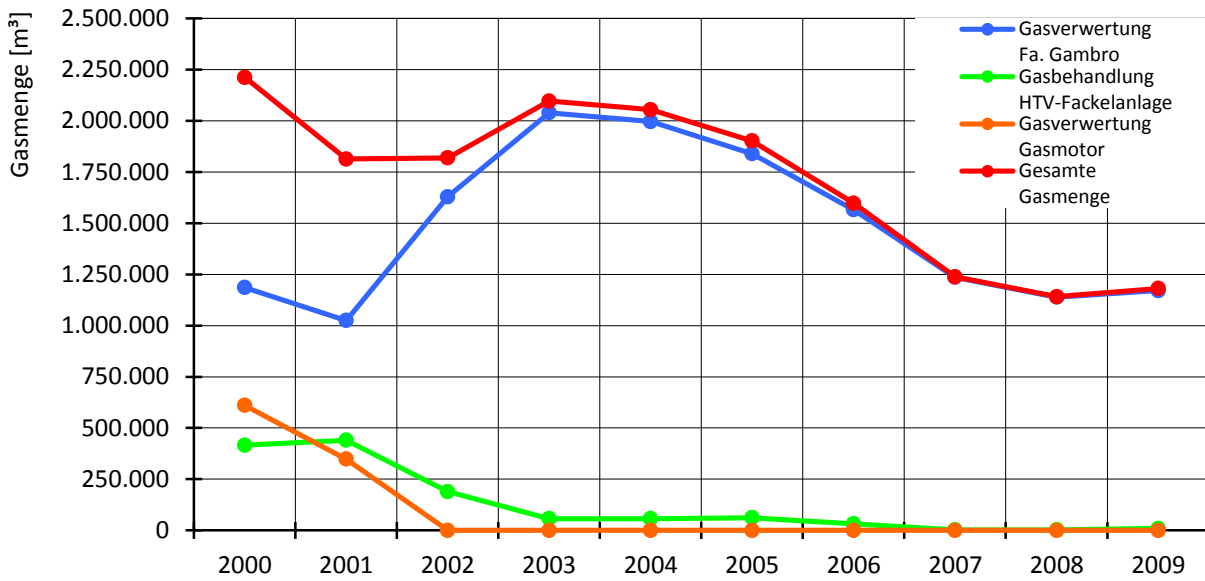
Jahr	Ablagerungsmenge MW*		Ablagerungsmenge MIN*		Ablagerungsmenge MAX*	
	Prognose MW I	Prognose MW II	Prognose MIN I	Prognose MIN II	Prognose MAX I	Prognose MAX II
	Gasbildung [m ³ *a ⁻¹]	Gasbildung [m ³ *a ⁻¹]	Gasbildung [m ³ *a ⁻¹]	Gasbildung [m ³ *a ⁻¹]	Gasbildung [m ³ *a ⁻¹]	Gasbildung [m ³ *a ⁻¹]
1982	0	0	0	0	0	0
1983	1.845.023	2.206.405	1.627.206	1.945.924	2.097.922	2.508.838
1984	3.582.542	4.307.549	3.231.134	3.884.560	4.006.161	4.817.336
1985	5.178.294	6.259.299	4.740.244	5.728.473	5.696.504	6.887.306
1986	6.679.662	8.114.966	6.202.865	7.532.812	7.218.633	8.773.703
1987	8.161.954	9.962.119	7.666.939	9.353.083	8.701.792	10.627.601
1988	9.643.652	11.821.511	9.068.659	11.111.902	10.259.524	12.583.195
1989	10.714.687	13.201.743	10.167.615	12.519.965	11.299.042	13.931.565
1990	11.672.818	14.452.786	10.987.849	13.601.326	12.376.517	15.330.306
1991	12.931.997	16.067.793	12.213.074	15.169.581	13.654.243	16.973.594
1992	14.026.732	17.493.595	13.288.457	16.566.141	14.767.062	18.426.885
1993	14.158.257	17.772.319	13.397.135	16.811.670	14.923.561	18.741.110
1994	14.138.489	17.862.375	13.378.042	16.896.826	14.901.538	18.833.985
1995	14.103.791	17.925.522	13.384.227	17.003.609	14.834.857	18.863.946
1996	13.689.865	17.526.623	12.997.248	16.632.602	14.386.628	18.428.289
1997	13.198.419	17.022.352	12.543.091	16.169.267	13.847.707	17.870.745
1998	12.733.522	16.537.163	12.113.365	15.723.235	13.349.011	17.347.768
1999	12.172.312	15.925.446	11.540.385	15.095.209	12.797.131	16.749.208
2000	11.787.992	15.513.578	11.084.856	14.595.974	12.500.260	16.443.880
2001	11.408.663	15.099.129	10.694.682	14.165.620	12.106.317	16.014.871
2002	10.952.047	14.584.431	10.238.488	13.648.580	11.634.948	15.485.035
2003	10.496.531	14.062.854	9.820.402	13.169.142	11.138.996	14.917.227
2004	10.041.899	13.534.789	9.411.608	12.693.947	10.637.052	14.334.032
2005	9.700.025	13.134.616	9.099.029	12.327.592	10.260.093	13.892.642
2006	9.131.412	12.458.306	8.565.218	11.692.148	9.659.093	13.177.841
2007	8.327.947	11.493.677	7.811.572	10.786.841	8.809.198	12.157.499
2008	7.595.178	10.603.738	7.124.238	9.951.632	8.034.084	11.216.162
2009	6.926.884	9.782.706	6.497.383	9.181.091	7.327.172	10.347.710
2010	6.317.394	9.025.245	5.925.683	8.470.212	6.682.460	9.546.502
2011	5.761.531	8.326.433	5.404.287	7.814.376	6.094.476	8.807.330
2012	5.254.579	7.681.729	4.928.769	7.209.320	5.558.228	8.125.391
2013	4.792.233	7.086.944	4.495.091	6.651.112	5.069.164	7.496.253
2014	4.370.569	6.538.212	4.099.571	6.136.126	4.623.133	6.915.829
2015	3.986.006	6.031.967	3.738.853	5.661.015	4.216.347	6.380.346
2016	3.635.281	5.564.921	3.409.875	5.222.691	3.845.354	5.886.325
2017	3.315.415	5.134.037	3.109.843	4.818.305	3.507.005	5.430.556
2018	3.023.695	4.736.516	2.836.210	4.445.231	3.198.426	5.010.075
2019	2.757.642	4.369.774	2.586.655	4.101.043	2.917.000	4.622.152
2020	2.515.000	4.031.429	2.359.057	3.783.505	2.660.335	4.264.266
2021	2.293.707	3.719.281	2.151.486	3.490.553	2.426.255	3.934.090
2022	2.091.886	3.431.302	1.962.178	3.220.285	2.212.770	3.629.479
2023	1.907.822	3.165.622	1.789.528	2.970.943	2.018.071	3.348.453
2024	1.739.955	2.920.512	1.632.069	2.740.907	1.840.502	3.089.187
2025	1.586.858	2.694.381	1.488.464	2.528.682	1.678.558	2.849.996
2026	1.447.231	2.485.759	1.357.496	2.332.890	1.530.863	2.629.325
2027	1.319.891	2.293.290	1.238.051	2.152.258	1.396.164	2.425.740
2028	1.203.755	2.115.724	1.129.116	1.985.612	1.273.316	2.237.918
2029	1.097.837	1.951.906	1.029.766	1.831.868	1.161.278	2.064.640
2030	1.001.239	1.800.773	939.158	1.690.030	1.059.099	1.904.778
2031	913.141	1.661.342	856.522	1.559.173	965.909	1.757.293
2032	832.795	1.532.706	781.157	1.438.448	880.920	1.621.229
2033	759.518	1.414.031	712.424	1.327.071	803.408	1.495.699
2034	692.688	1.304.545	649.738	1.224.318	732.717	1.379.889
2035	631.739	1.203.536	592.568	1.129.521	668.246	1.273.046
2036	576.153	1.110.348	540.429	1.042.064	609.448	1.174.476
2037	525.458	1.024.375	492.877	961.378	555.823	1.083.538
2038	479.223	945.059	449.509	886.940	506.916	999.641
2039	437.057	871.885	409.957	818.266	462.313	922.241
2040	398.601	804.376	373.885	754.908	421.635	850.833
2041	363.528	742.094	340.987	696.457	384.535	784.954
2042	331.542	684.635	310.984	642.531	350.700	724.176
2043	302.369	631.625	283.621	592.781	319.843	668.104
2044	275.764	582.719	258.665	546.883	291.700	616.374
2045	251.500	537.600	235.906	504.538	266.034	568.649
2046	229.371	495.974	215.149	465.473	242.625	524.619
2047	209.189	457.572	196.218	429.432	221.277	483.999
2048	190.782	422.142	178.953	396.182	201.807	446.523
2049	173.995	389.457	163.207	365.506	184.050	411.950
2050	158.686	359.301	148.846	337.205	167.856	380.053

* Betrachtete Abfallarten: Hausmüll, Gewerbeabfall, Sperrmüll und Schlämme

ANHANG 56: MODELLIERUNG DER ABGEBAUTEN ORG. SUBSTANZ | ZEITRAUM 1982 - 2050

Jahr	Ablagerungsmenge MW*		Ablagerungsmenge MIN*		Ablagerungsmenge MAX*	
	Prognose MW I	Prognose MW II	Prognose MIN I	Prognose MINII	Prognose MAX I	Prognose MAX II
	Abgebaute Masse [Mg]	Abgebaute Masse [Mg]	Abgebaute Masse [Mg]	Abgebaute Masse [Mg]	Abgebaute Masse [Mg]	Abgebaute Masse [Mg]
1982	0	0	0	0	0	0
1983	1.370	1.621	1.209	1.429	1.558	1.843
1984	4.031	4.785	3.609	4.283	4.534	5.381
1985	7.878	9.382	7.130	8.490	8.765	10.440
1986	12.839	15.343	11.737	14.024	14.127	16.885
1987	18.902	22.661	17.432	20.894	20.590	24.691
1988	26.065	31.344	24.168	29.056	28.211	33.934
1989	34.023	41.041	31.720	38.252	36.604	44.167
1990	42.694	51.657	39.881	48.243	45.797	55.428
1991	52.299	63.459	48.953	59.385	55.939	67.895
1992	62.718	76.309	58.823	71.554	66.907	81.431
1993	73.234	89.363	68.774	83.902	77.992	95.197
1994	83.736	102.484	78.711	96.314	89.060	109.031
1995	94.212	115.651	88.653	108.803	100.079	122.887
1996	104.380	128.525	98.307	121.021	110.765	136.423
1997	114.184	141.028	107.623	132.898	121.051	149.550
1998	123.642	153.175	116.621	144.447	130.966	162.292
1999	132.683	164.873	125.193	155.535	140.472	174.595
2000	141.439	176.268	133.426	166.256	149.757	186.674
2001	149.913	187.359	141.370	176.661	158.749	198.437
2002	158.048	198.072	148.975	186.686	167.391	209.812
2003	165.844	208.402	156.269	196.360	175.665	220.769
2004	173.303	218.343	163.260	205.684	183.566	231.298
2005	180.508	227.991	170.018	214.739	191.187	241.502
2006	187.291	237.142	176.380	223.327	198.361	251.182
2007	193.477	245.585	182.183	231.250	204.904	260.112
2008	199.118	253.373	187.474	238.560	210.872	268.351
2009	204.263	260.559	192.300	245.304	216.314	275.951
2010	208.956	267.189	196.702	251.526	221.278	282.963
2011	213.235	273.305	200.716	257.266	225.805	289.433
2012	217.138	278.947	204.377	262.561	229.933	295.401
2013	220.698	284.153	207.716	267.446	233.698	300.907
2014	223.944	288.955	210.761	271.954	237.132	305.987
2015	226.905	293.386	213.538	276.112	240.264	310.674
2016	229.605	297.474	216.071	279.948	243.120	314.998
2017	232.067	301.245	218.381	283.487	245.725	318.987
2018	234.313	304.724	220.487	286.752	248.101	322.667
2019	236.362	307.934	222.409	289.765	250.268	326.062
2020	238.230	310.895	224.161	292.544	252.244	329.194
2021	239.933	313.627	225.759	295.108	254.004	332.084
2022	241.487	316.147	227.216	297.473	255.689	334.750
2023	242.904	318.472	228.546	299.656	257.188	337.209
2024	244.197	320.618	229.758	301.669	258.556	339.478
2025	245.375	322.597	230.863	303.526	259.802	341.572
2026	246.450	324.423	231.872	305.240	260.939	343.503
2027	247.431	326.107	232.791	306.821	261.976	345.285
2028	248.325	327.661	233.630	308.279	262.922	346.929
2029	249.140	329.095	234.395	309.625	263.785	348.445
2030	249.884	330.418	235.093	310.866	264.571	349.844
2031	250.562	331.638	235.729	312.011	265.289	351.135
2032	251.181	332.764	236.309	313.068	265.943	352.326
2033	251.745	333.802	236.838	314.043	266.540	353.425
2034	252.260	334.761	237.321	314.942	267.084	354.438
2035	252.729	335.645	237.761	315.772	267.581	355.373
2036	253.157	336.460	238.162	316.537	268.033	356.236
2037	253.547	337.213	238.528	317.243	268.446	357.032
2038	253.903	337.907	238.862	317.895	268.823	357.766
2039	254.228	338.547	239.167	318.496	269.166	358.444
2040	254.524	339.138	239.444	319.050	269.479	359.069
2041	254.794	339.683	239.698	319.562	269.765	359.645
2042	255.040	340.186	239.929	320.034	270.025	360.177
2043	255.265	340.650	240.139	320.469	270.263	360.668
2044	255.469	341.078	240.332	320.871	270.480	361.121
2045	255.656	341.473	240.507	321.242	270.677	361.538
2046	255.827	341.837	240.667	321.584	270.857	361.924
2047	255.982	342.173	240.812	321.899	271.022	362.279
2048	256.124	342.483	240.945	322.190	271.172	362.607
2049	256.253	342.770	241.066	322.458	271.308	362.910
2050	256.371	343.033	241.177	322.706	271.433	363.189

* Betrachtete Abfallarten: Hausmüll, Gewerbeabfall, Sperrmüll und Schlämme



ANHANG 57: GEFASSTE UND ENTSORGT GASMENGEN - 2000 BIS 2009

ANHANG 58: KENNWERTE DER LINEAREN TRENDABLEITUNG ZUR ZEITSPEZIFISCHEN HAUSMÜLLZUSAMMENSETZUNG UND ZUM SPEZIFISCHEN HAUSMÜLLAUFKOMMEN (ÜBERTRAGBARKEIT NUR GEWÄHRLEISTET BEI VERWENDUNG VON MS-EXCEL ODER DATUMSTRANSFORMATION)

Fraktion	Statistisches Merkmal	Mittelwert [Gew.-% FM]	Steigung [Gew.-% FM*a ⁻¹]	Achsenabschnitt [Gew.-% FM]	Korrelation [dimensionslos]	R ² [dimensionslos]	N [Anzahl]
Metalle	Oberes Quantil	3,7	-0,1	223,4	-0,8	0,6	231,0
	Maximum	3,8	-0,1	226,1	-0,8	0,6	231,0
	Minimum	2,4	-0,1	196,3	-0,9	0,8	231,0
	Unteres Quantil	2,5	-0,1	200,0	-0,9	0,8	231,0
	Mittelwert	3,1	-0,1	211,3	-0,9	0,8	231,0
	Median	3,1	-0,1	206,3	-0,9	0,8	231,0
PPK	Oberes Quantil	17,0	-0,5	1.081,4	-0,7	0,5	217,0
	Maximum	17,7	-0,5	1.079,8	-0,7	0,5	217,0
	Minimum	8,6	-0,5	939,2	-0,7	0,5	217,0
	Unteres Quantil	9,3	-0,5	940,2	-0,8	0,6	217,0
	Mittelwert	13,3	-0,5	1.036,3	-0,8	0,7	217,0
	Median	13,3	-0,5	1.100,5	-0,8	0,7	217,0
Glas	Oberes Quantil	8,8	-0,5	913,6	-0,7	0,5	217,0
	Maximum	9,4	-0,5	967,1	-0,7	0,5	217,0
	Minimum	3,2	-0,3	533,9	-0,8	0,7	217,0
	Unteres Quantil	3,7	-0,3	623,0	-0,9	0,8	217,0
	Mittelwert	6,2	-0,4	768,4	-0,9	0,7	217,0
	Median	6,1	-0,4	759,6	-0,9	0,7	217,0
Kunststoffe	Oberes Quantil	9,4	0,2	-476,9	0,6	0,4	206,0
	Maximum	10,1	0,3	-527,0	0,6	0,4	206,0
	Minimum	4,9	0,0	7,1	0,0	0,0	206,0
	Unteres Quantil	5,3	0,0	6,6	0,0	0,0	206,0
	Mittelwert	7,3	0,1	-238,6	0,5	0,2	206,0
	Median	7,2	0,1	-244,7	0,4	0,2	206,0
Organik	Oberes Quantil	35,7	-0,4	787,1	-0,3	0,1	212,0
	Maximum	36,8	-0,3	731,5	-0,2	0,1	212,0
	Minimum	16,5	-0,9	1.884,7	-0,7	0,5	212,0
	Unteres Quantil	17,7	-0,9	1.888,7	-0,7	0,5	212,0
	Mittelwert	26,3	-0,7	1.443,9	-0,6	0,4	212,0
	Median	25,6	-0,8	1.688,2	-0,7	0,4	212,0

FORTSETZUNG ANHANG 58

		[Gew.-% FM]	[Gew.-% FM*a ⁻¹]	[Gew.-% FM]	[dimensionslos]	[dimensionslos]	[Anzahl]
Textilien	Maximum	4,2	0,2	-360,4	0,8	0,7	208,0
	Minimum	1,9	0,1	-119,0	0,5	0,3	208,0
	Unteres Quantil	2,1	0,1	-135,7	0,6	0,3	208,0
	Mittelwert	3,1	0,1	-253,6	0,8	0,7	208,0
	Median	3,1	0,1	-283,0	0,8	0,6	208,0
Mineralien	Oberes Quantil	4,6	0,1	-142,8	0,3	0,1	193,0
	Maximum	4,9	0,1	-148,2	0,3	0,1	193,0
	Minimum	1,7	0,0	-92,3	0,3	0,1	193,0
	Unteres Quantil	1,8	0,0	-93,7	0,4	0,1	193,0
	Mittelwert	3,1	0,1	-145,1	0,5	0,3	193,0
Median	3,0	0,1	-172,4	0,6	0,3	193,0	
Komplexe Produkte	Oberes Quantil	7,7	-0,1	257,1	-0,2	0,0	186,0
	Maximum	8,1	-0,1	282,8	-0,2	0,0	186,0
	Minimum	2,4	0,1	-152,6	0,3	0,1	186,0
	Unteres Quantil	2,7	0,1	-148,6	0,3	0,1	186,0
	Mittelwert	5,2	0,0	37,9	0,0	0,0	186,0
Median	5,3	0,0	6,6	0,0	0,0	186,0	
Verbundverpackungen	Oberes Quantil	2,8	0,0	42,6	-0,1	0,0	147,0
	Maximum	2,9	0,0	47,7	-0,1	0,0	147,0
	Minimum	1,8	0,0	22,4	-0,1	0,0	147,0
	Unteres Quantil	1,9	0,0	34,6	-0,2	0,0	147,0
	Mittelwert	2,4	0,0	46,5	-0,1	0,0	147,0
Median	2,5	0,0	62,0	-0,2	0,0	147,0	
Problemafälle	Oberes Quantil	0,8	0,0	-36,1	0,4	0,2	180,0
	Maximum	0,8	0,0	-38,9	0,4	0,2	180,0
	Minimum	0,2	0,0	2,9	-0,1	0,0	180,0
	Unteres Quantil	0,2	0,0	-4,1	0,1	0,0	180,0
	Mittelwert	0,5	0,0	-18,3	0,4	0,2	180,0
Median	0,5	0,0	-11,5	0,3	0,1	180,0	
Stoffe ang.	Oberes Quantil	12,6	0,6	-1.097,0	0,6	0,3	203,0
	Maximum	13,2	0,6	-1.089,3	0,5	0,3	203,0
	Minimum	6,4	0,5	-999,1	0,6	0,3	203,0
	Unteres Quantil	5,6	0,5	-973,2	0,6	0,3	203,0
	Mittelwert	8,6	0,5	-1.070,6	0,7	0,5	203,0
Median	8,3	0,6	-1.165,5	0,7	0,5	203,0	
Rest- und Feinfraktion	Oberes Quantil	38,2	1,1	-2.174,3	0,6	0,4	212,0
	Maximum	39,8	1,1	-2.206,2	0,6	0,4	212,0
	Minimum	15,3	0,3	-585,4	0,2	0,0	212,0
	Unteres Quantil	14,6	-0,2	353,1	-0,1	0,0	212,0
	Mittelwert	26,7	0,6	-1.226,6	0,4	0,2	212,0
Median	27,3	0,9	-1.710,7	0,5	0,2	212,0	

ANHANG 59: KENNWERTE DER GEWERBEABFALLANALYSE [GEW.-% FM]

	Metalle						
	Oberes Quantil	Maximum	Minimum	Unteres Quantil	Mittelwert	Median	N
Baugewerbe	4,4	4,9	0,0	0,3	2,2	1,8	7,0
Dienstleistung	6,4	7,2	0,4	0,6	3,2	3,3	13,0
Keine Differenzierung	5,9	11,5	0,4	0,5	3,1	2,8	24,0
Handel	6,6	7,5	1,1	1,1	2,8	1,6	6,0
Öffentliche Einrichtungen	8,5	9,7	0,5	0,5	3,1	2,2	7,0
Sonstige Wirtschaftszweige	11,9	14,3	0,2	0,6	4,6	2,4	11,0
Verarbeitendes Gewerbe	4,7	5,4	0,1	0,3	2,0	1,7	18,0
Alle Wirtschaftszweige	7,4	14,3	0,0	0,4	3,0	2,4	86,0

	PPK						
	Oberes Quantil	Maximum	Minimum	Unteres Quantil	Mittelwert	Median	N
Baugewerbe	7,1	7,4	0,9	1,1	4,2	4,0	7,0
Dienstleistung	27,0	29,3	3,9	4,0	10,9	6,7	14,0
Keine Differenzierung	26,6	45,4	2,3	3,6	17,0	16,3	24,0
Handel	38,4	40,2	4,1	5,6	21,5	19,0	7,0
Öffentliche Einrichtungen	23,1	24,7	0,5	1,1	10,2	3,3	7,0
Sonstige Wirtschaftszweige	19,8	21,1	1,8	2,5	9,9	10,1	11,0
Verarbeitendes Gewerbe	32,7	42,0	2,3	2,4	11,8	9,6	18,0
Alle Wirtschaftszweige	32,5	45,4	0,5	2,3	12,9	9,9	88,0

	Glas						
	Oberes Quantil	Maximum	Minimum	Unteres Quantil	Mittelwert	Median	N
Baugewerbe	5,8	6,2	0,6	0,8	3,1	2,8	4,0
Dienstleistung	4,3	4,5	0,3	0,3	1,8	1,5	11,0
Keine Differenzierung	12,9	13,0	0,1	0,5	4,3	3,5	22,0
Handel	2,8	3,0	0,0	0,2	1,4	1,0	5,0
Öffentliche Einrichtungen	12,6	14,6	0,7	0,8	4,7	2,5	5,0
Sonstige Wirtschaftszweige	8,6	10,5	0,3	0,4	2,5	0,6	9,0
Verarbeitendes Gewerbe	14,5	19,1	0,3	0,4	3,8	1,7	14,0
Alle Wirtschaftszweige	12,5	19,1	0,0	0,3	3,3	1,8	70,0

	Kunststoffe						
	Oberes Quantil	Maximum	Minimum	Unteres Quantil	Mittelwert	Median	N
Baugewerbe	26,0	28,3	0,7	1,9	12,2	10,6	7,0
Dienstleistung	21,3	23,9	2,9	3,4	8,7	6,5	14,0
Keine Differenzierung	31,7	57,6	3,2	5,8	16,0	12,3	24,0
Handel	74,3	90,6	12,9	13,1	28,4	15,1	7,0
Öffentliche Einrichtungen	35,7	47,2	1,6	2,2	10,3	3,6	7,0
Sonstige Wirtschaftszweige	17,5	18,1	1,3	2,4	8,7	7,3	11,0
Verarbeitendes Gewerbe	44,0	49,1	2,4	2,9	18,9	16,3	18,0
Alle Wirtschaftszweige	40,8	90,6	0,7	2,9	14,8	10,9	88,0

	Organik						
	Oberes Quantil	Maximum	Minimum	Unteres Quantil	Mittelwert	Median	N
Baugewerbe	49,0	62,6	1,0	1,0	13,0	2,6	6,0
Dienstleistung	11,5	14,0	2,6	2,6	5,8	5,1	12,0
Keine Differenzierung	33,7	35,4	0,2	0,3	12,8	8,0	23,0
Handel	20,4	24,7	1,0	1,1	7,3	4,5	6,0
Öffentliche Einrichtungen	52,3	62,0	6,2	6,6	20,8	12,9	6,0
Sonstige Wirtschaftszweige	13,8	18,1	0,5	1,0	5,6	4,4	11,0
Verarbeitendes Gewerbe	14,0	15,7	0,1	0,2	2,9	1,0	17,0
Alle Wirtschaftszweige	31,2	62,6	0,1	0,3	8,9	4,4	81,0

FORTSETZUNG ANHANG 59

	Holz						
	Oberes Quantil	Maximum	Minimum	Unteres Quantil	Mittelwert	Median	N
Baugewerbe	18,7	19,6	0,8	1,8	9,6	7,3	7,0
Dienstleistung	16,1	17,1	0,3	0,8	7,7	5,6	13,0
Keine Differenzierung	14,0	15,9	0,6	0,9	6,0	3,9	23,0
Handel	32,6	36,2	1,7	5,2	18,2	16,7	6,0
Öffentliche Einrichtungen	16,8	20,3	0,3	0,6	6,3	4,0	7,0
Sonstige Wirtschaftszweige	21,7	26,7	0,3	1,1	10,4	8,8	11,0
Verarbeitendes Gewerbe	28,1	37,9	1,0	1,0	7,3	3,6	18,0
Alle Wirtschaftszweige	21,5	37,9	0,3	0,8	8,3	5,8	85,0

	Textilien						
	Oberes Quantil	Maximum	Minimum	Unteres Quantil	Mittelwert	Median	N
Baugewerbe	4,2	4,4	0,0	0,1	1,8	1,0	5,0
Dienstleistung	4,2	4,6	0,1	0,1	1,1	0,3	10,0
Keine Differenzierung	5,3	6,3	0,1	0,2	1,8	1,2	24,0
Handel	2,3	2,5	0,1	0,1	0,9	0,4	6,0
Öffentliche Einrichtungen	0,9	1,0	0,1	0,1	0,4	0,3	4,0
Sonstige Wirtschaftszweige	2,0	2,2	0,2	0,2	0,8	0,6	10,0
Verarbeitendes Gewerbe	32,7	34,9	0,1	0,1	6,1	0,5	18,0
Alle Wirtschaftszweige	6,4	34,9	0,0	0,1	2,4	0,7	77,0

	Mineralien						
	Oberes Quantil	Maximum	Minimum	Unteres Quantil	Mittelwert	Median	N
Baugewerbe	60,4	68,0	3,8	6,7	28,7	23,7	6,0
Dienstleistung	36,2	36,5	3,0	3,0	14,6	12,8	11,0
Keine Differenzierung	22,3	36,1	1,3	2,0	7,4	5,5	24,0
Handel	13,9	15,5	0,4	0,5	6,0	6,1	5,0
Öffentliche Einrichtungen	50,2	51,5	9,2	11,9	32,6	34,9	4,0
Sonstige Wirtschaftszweige	63,1	64,8	3,9	4,1	23,3	15,2	10,0
Verarbeitendes Gewerbe	70,1	74,3	0,2	0,7	18,3	8,8	16,0
Alle Wirtschaftszweige	62,0	74,3	0,2	1,2	15,7	7,6	76,0

	Problemabfälle						
	Oberes Quantil	Maximum	Minimum	Unteres Quantil	Mittelwert	Median	N
Baugewerbe							0,0
Dienstleistung	10,1	10,6	0,1	0,6	5,4	5,4	2,0
Keine Differenzierung	2,9	3,4	0,1	0,2	1,1	0,7	8,0
Handel	2,6	2,7	0,1	0,2	1,4	1,4	2,0
Öffentliche Einrichtungen	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sonstige Wirtschaftszweige	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Verarbeitendes Gewerbe	15,8	20,8	0,2	0,3	3,9	0,7	6,0
Alle Wirtschaftszweige	12,1	20,8	0,1	0,1	2,5	0,7	18,0

	Produktionsspezifisch/ Sortierreste						
	Oberes Quantil	Maximum	Minimum	Unteres Quantil	Mittelwert	Median	N
Baugewerbe	56,5	60,2	2,3	5,3	29,9	28,2	5,0
Dienstleistung	53,1	54,4	17,5	19,6	36,7	36,7	6,0
Keine Differenzierung	33,0	35,2	0,7	1,3	14,8	14,5	18,0
Handel	26,9	29,6	0,1	0,9	11,7	8,6	4,0
Öffentliche Einrichtungen	9,2	9,4	4,5	4,8	7,1	7,4	3,0
Sonstige Wirtschaftszweige	50,1	55,2	17,2	17,6	28,5	20,7	4,0
Verarbeitendes Gewerbe	28,2	32,4	8,2	8,7	15,3	12,7	6,0
Alle Wirtschaftszweige	53,1	60,2	0,1	1,5	19,8	16,6	46,0

FORTSETZUNG ANHANG 59

Feinfraktion							
	Oberes Quantil	Maximum	Minimum	Unteres Quantil	Mittelwert	Median	N
Baugewerbe	1,1	1,1	0,5	0,5	0,8	0,8	2,0
Dienstleistung	22,8	30,3	0,7	0,8	7,8	4,6	9,0
Keine Differenzierung	25,9	26,9	1,5	2,0	8,3	5,0	11,0
Handel	3,8	3,9	2,9	2,9	3,4	3,4	2,0
Öffentliche Einrichtungen	6,7	7,2	0,7	0,9	3,4	2,4	3,0
Sonstige Wirtschaftszweige	17,8	20,9	1,0	1,1	6,0	2,0	7,0
Verarbeitendes Gewerbe	3,4	3,5	0,2	0,3	1,5	1,1	11,0
Alle Wirtschaftszweige	24,1	30,3	0,2	0,5	5,3	3,3	45,0

Hausmüllartig							
	Oberes Quantil	Maximum	Minimum	Unteres Quantil	Mittelwert	Median	N
Baugewerbe	20,8	22,6	3,8	3,9	9,8	4,8	5,0
Dienstleistung	59,8	61,2	4,8	10,1	32,2	27,3	12,0
Keine Differenzierung	57,8	71,0	6,6	7,6	24,7	18,6	11,0
Handel	20,6	21,7	0,1	2,0	11,9	12,5	5,0
Öffentliche Einrichtungen	44,1	47,2	4,1	6,5	24,3	23,0	6,0
Sonstige Wirtschaftszweige	30,1	32,0	1,6	3,4	15,4	12,7	10,0
Verarbeitendes Gewerbe	22,9	37,1	1,6	1,8	9,7	8,1	17,0
Alle Wirtschaftszweige	47,2	71,0	0,1	1,9	18,7	14,1	66,0

Sperrmüll							
	Oberes Quantil	Maximum	Minimum	Unteres Quantil	Mittelwert	Median	N
Baugewerbe	9,0	10,7	0,2	0,6	3,7	2,9	6,0
Dienstleistung	8,0	8,0	0,4	0,4	2,9	1,6	12,0
Keine Differenzierung	14,5	15,0	0,6	0,8	5,5	3,6	22,0
Handel	11,4	13,4	0,5	0,6	3,9	1,7	6,0
Öffentliche Einrichtungen	11,1	12,1	0,2	0,3	4,3	1,0	5,0
Sonstige Wirtschaftszweige	8,2	8,5	0,0	0,5	3,3	2,1	10,0
Verarbeitendes Gewerbe	21,0	32,1	0,2	0,7	8,3	7,2	17,0
Alle Wirtschaftszweige	14,6	32,1	0,0	0,4	5,1	2,9	78,0

Erdaushub							
	Oberes Quantil	Maximum	Minimum	Unteres Quantil	Mittelwert	Median	N
Baugewerbe	2,6	2,6	2,3	2,3	2,4	2,4	2,0
Dienstleistung	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	1,0
Keine Differenzierung	1,1	1,2	0,5	0,5	0,8	0,8	4,0
Handel	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Öffentliche Einrichtungen	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	1,0
Sonstige Wirtschaftszweige	1,5	1,6	0,5	0,5	1,0	1,0	2,0
Verarbeitendes Gewerbe	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Alle Wirtschaftszweige	3,1	3,7	0,3	0,4	1,4	1,0	11,0

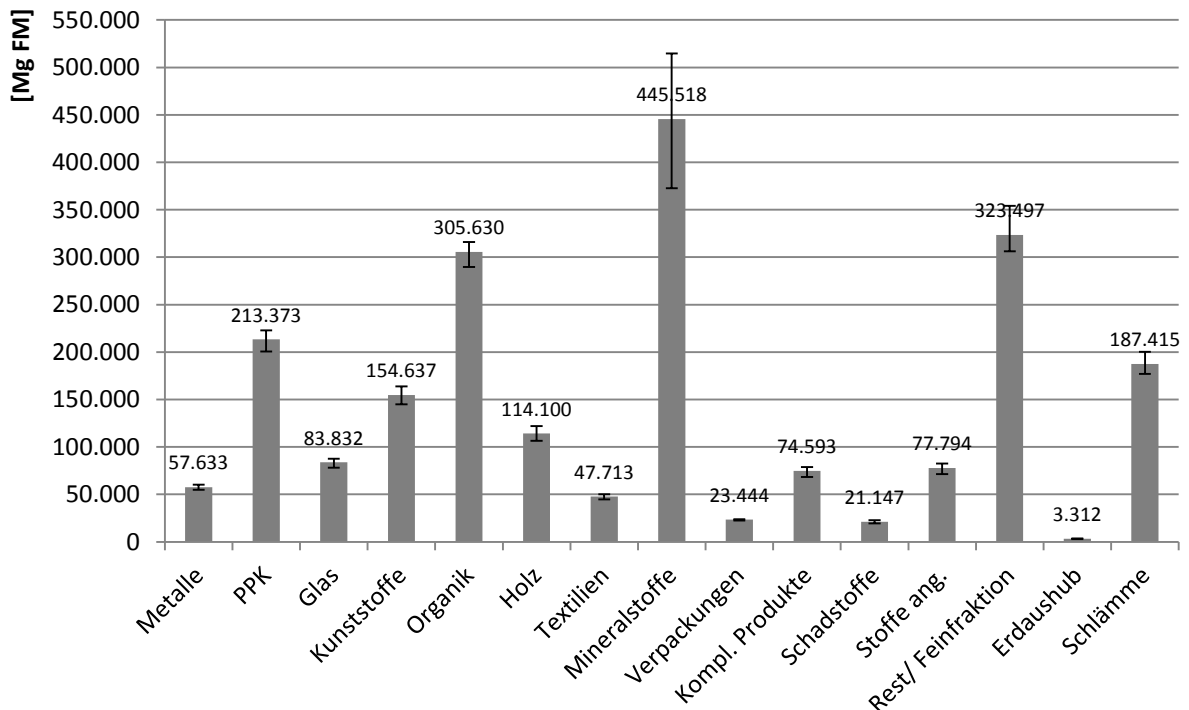
Schlämme							
	Oberes Quantil	Maximum	Minimum	Unteres Quantil	Mittelwert	Median	N
Baugewerbe	3,1	3,4	0,2	0,2	1,4	0,5	3,0
Dienstleistung	2,0	2,2	0,4	0,4	1,0	0,5	3,0
Keine Differenzierung	6,1	6,6	0,1	0,2	2,8	2,1	7,0
Handel	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Öffentliche Einrichtungen	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	1,0
Sonstige Wirtschaftszweige	60,3	60,3	60,3	60,3	60,3	60,3	1,0
Verarbeitendes Gewerbe	43,7	63,2	0,8	1,9	13,9	7,7	10,0
Alle Wirtschaftszweige	52,2	63,2	0,1	0,2	9,4	4,0	25,0

ANHANG 60: KENNWERTE DER ZUSAMMENSETZUNG VON SPERRMÜLL [GEW.-% FM]

Jahr	Oberes Quantil	Maximum	Minimum	Unteres Quantil	Mittelwert	Median	N
Metalle	12,5	12,5	0,3	1,0	6,3	8,2	21,0
PPK	3,9	11,0	0,1	0,6	2,8	3,0	21,0
Glas	1,5	3,0	0,1	0,1	0,7	0,5	19,0
Kunststoffe	10,0	12,0	0,9	2,2	4,3	3,7	21,0
Organik	8,3	20,0	0,6	1,6	3,6	2,5	15,0
Holz, Möbel	54,8	60,4	25,0	38,5	44,6	42,1	21,0
Textilien	14,4	14,5	0,7	0,7	4,0	1,0	21,0
Mineralstoffe	4,6	15,0	0,1	0,3	2,6	2,1	20,0
Komplexe Produkte	28,1	33,0	1,3	16,8	21,6	21,4	20,0
Schadstoffe	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1,0
Stoffe ang.	18,0	18,6	1,6	1,9	11,5	13,7	20,0
Rest/ Feinfraktion	13,8	14,5	0,2	0,9	7,4	7,4	2,0

ANHANG 61: PROZENTUALE VERTEILUNG DER STOFFGRUPPEN UNTER DERÜCKSICHTIGUNG DER VARIATION DER ABLAGERUNGSMENGE

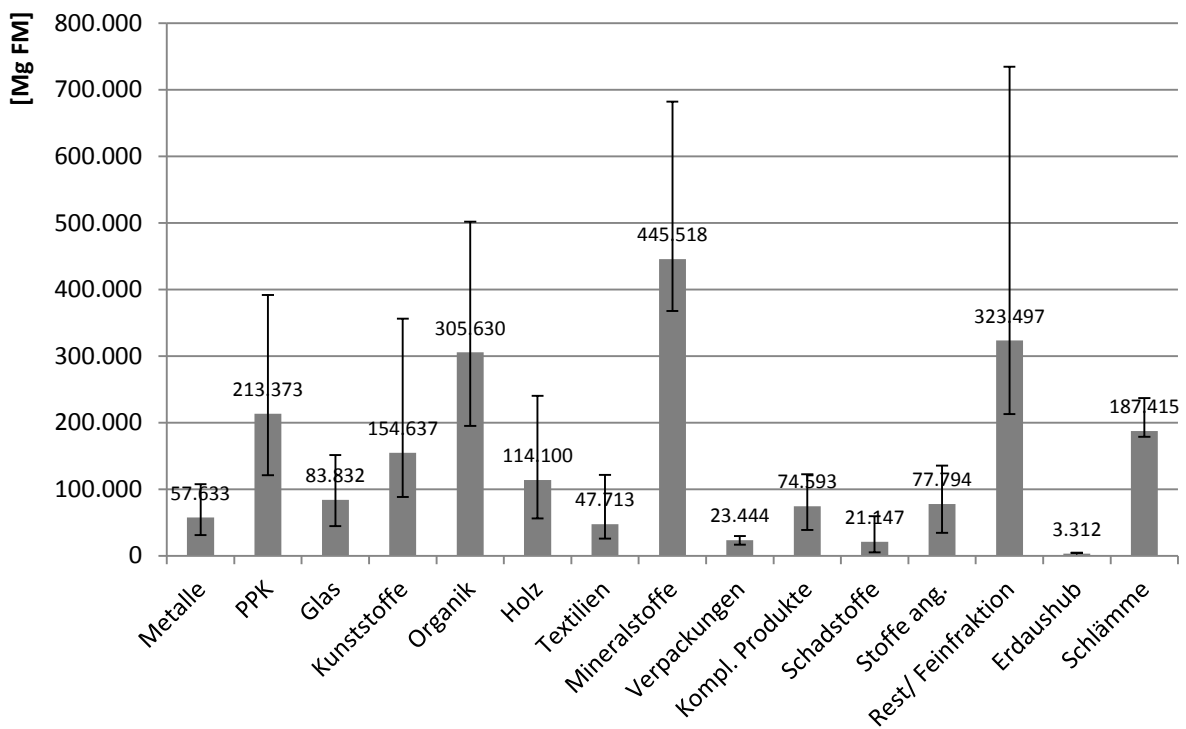
Szenario	Metalle	PPK	Glas	Kunststoffe	Organik	Holz	Textilien	Mineralstoffe	Verpackungen	Kompl. Produkte	Schadstoffe	Stoffe ang.	Rest/ Feinfraktion	Erdaushub	Schlämme
MIN	2,8%	10,2%	4,0%	7,4%	14,8%	5,4%	2,3%	19,0%	1,2%	3,5%	1,0%	3,6%	15,6%	0,2%	9,0%
MW	2,7%	10,0%	3,9%	7,2%	14,3%	5,3%	2,2%	20,9%	1,1%	3,5%	1,0%	3,6%	15,2%	0,2%	8,8%
MAX	2,6%	9,7%	3,8%	7,1%	13,7%	5,3%	2,2%	22,3%	1,0%	3,4%	1,0%	3,6%	15,4%	0,2%	8,7%



ANHANG 62: MODELLIERTES ABLAGERUNGSPOTENZIAL UND VARIATION NACH STOFFFRAKTIONEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER DEFINIERTEN GESAMTABLAGERUNGSMENGEN UND DER MITTLEREN ABFALLZUSAMMENSETZUNG NACH ABFALLARTEN | EINZELBETRACHTUNG THEORIE

ANHANG 63: PROZENTUALE VERTEILUNG DER STOFFGRUPPEN UNTER DERÜCKSICHTIGUNG DER VARIATION DER ABFALLZUSAMMENSETZUNG

Szenario	Metalle	PPK	Glas	Kunststoffe	Organik	Holz	Textilien	Mineralstoffe	Verpackungen	Kompl. Produkte	Schadstoffe	Stoffe ang.	Rest/ Feinfraktion	Erdaushub	Schlämme
Quantil (2,5%)	2,2%	8,5%	3,1%	6,2%	13,7%	4,0%	1,8%	25,9%	1,2%	2,7%	0,4%	2,4%	15,0%	0,3%	12,6%
MW	2,7%	10,0%	3,9%	7,2%	14,3%	5,3%	2,2%	20,9%	1,1%	3,5%	1,0%	3,6%	15,2%	0,2%	8,8%
Quantil (97,5%)	2,8%	10,1%	3,9%	9,2%	13,0%	6,2%	3,1%	17,6%	0,8%	3,2%	1,5%	3,5%	19,0%	0,1%	6,1%



ANHANG 64: MODELLIERTES ABLAGERUNGSPOTENZIAL UND VARIATION NACH STOFFFRAKTIONEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER VARIATION DER ABFALLZUSAMMENSETZUNG BEI MITTLERER GESAMTABLAGERUNGSMENGE | EINZELBETRACHTUNG THEORIE

ANHANG 65: THEORETISCHES RESSOURCENPOTENZIAL DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DES ABBAUS DER ORGANISCHEN SUBSTANZ

Stofffraktion	[Mg FM]	[Gew.-% FM]
Metalle	57.633	3,0%
PPK	140.205	7,4%
Glas	83.832	4,4%
Kunststoffe	154.637	8,2%
Organik	200.006	10,6%
Holz	114.100	6,0%
Textilien	47.713	2,5%
Mineralstoffe	445.518	23,6%
Verpackungen	23.444	1,2%
Kompl. Produkte	74.593	3,9%
Schadstoffe	21.147	1,1%
Stoffe ang.	77.794	4,1%
Rest/Feinfraktion	323.497	17,1%
Erdaushub	3.312	0,2%
Schlämme	122.913	6,5%
Summe der Fraktionen	1.890.344	100,0%
Abgebaute organische Substanz	243.293	
Ausgangsmasse der Betrachtung	2.133.637	

ANHANG 66: THEORETISCHES RESSOURCENPOTENZIAL DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DES ABBAUS DER ORGANISCHEN SUBSTANZ UND STOFFSPEZIFISCHER WASSERGEHALTE

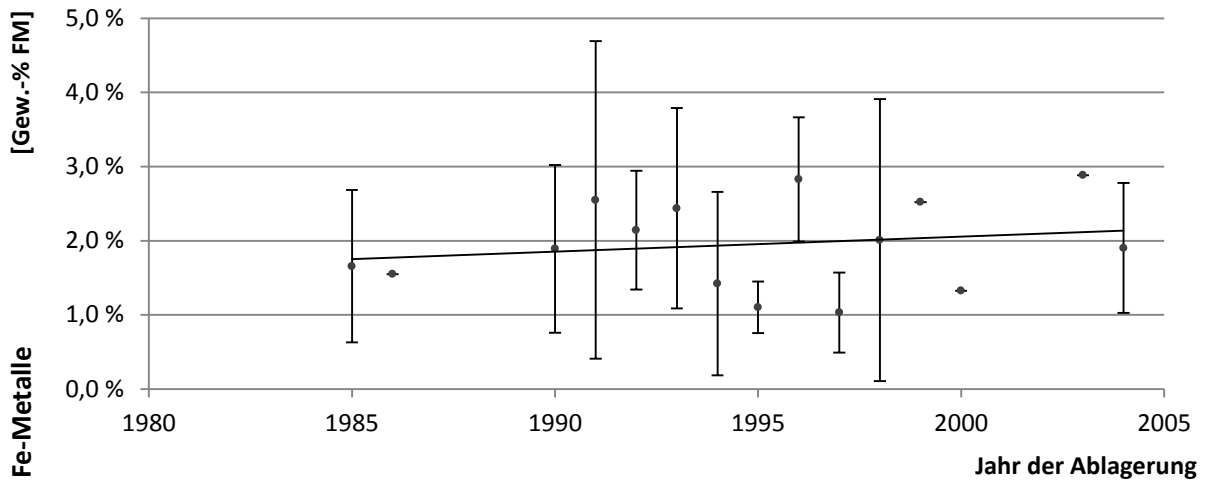
Stofffraktion	Stoffspezifischer Wassergehalt	[Mg TM]	[Gew.-% TM]
Metalle	1,4%	56.826	4,7%
PPK	58,1%	58.746	4,8%
Glas	1,8%	82.323	6,8%
Kunststoffe	10,6%	138.246	11,4%
Organik	56,2%	87.603	7,2%
Holz	56,2%	49.976	4,1%
Textilien	52,4%	22.711	1,9%
Mineralstoffe	11,0%	396.511	32,7%
Verpackungen	40,6%	13.926	1,1%
Kompl. Produkte	40,6%	44.308	3,7%
Schadstoffe	18,0%	17.341	1,4%
Stoffe ang.	53,3%	36.330	3,0%
Rest/Feinfraktion	41,9%	187.952	15,5%
Erdaushub	43,7%	1.864	0,2%
Schlämme	85,0%	18.437	1,5%
Summe der Fraktionen		1.213.100	100,0%
Abgebaute organische Substanz		243.293	
Wasser (stoffspezifische Gehalte berücksichtigt)		677.244	
Ausgangsmasse der Betrachtung		2.133.637	

ANHANG 67: BOHRLOCHSPEZIFISCHE ZUSAMMENSETZUNG DES DEPONIEGUTS DER IN-SITU SORTIERUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER NACHSORTIERUNG DER SORTIERRESTE

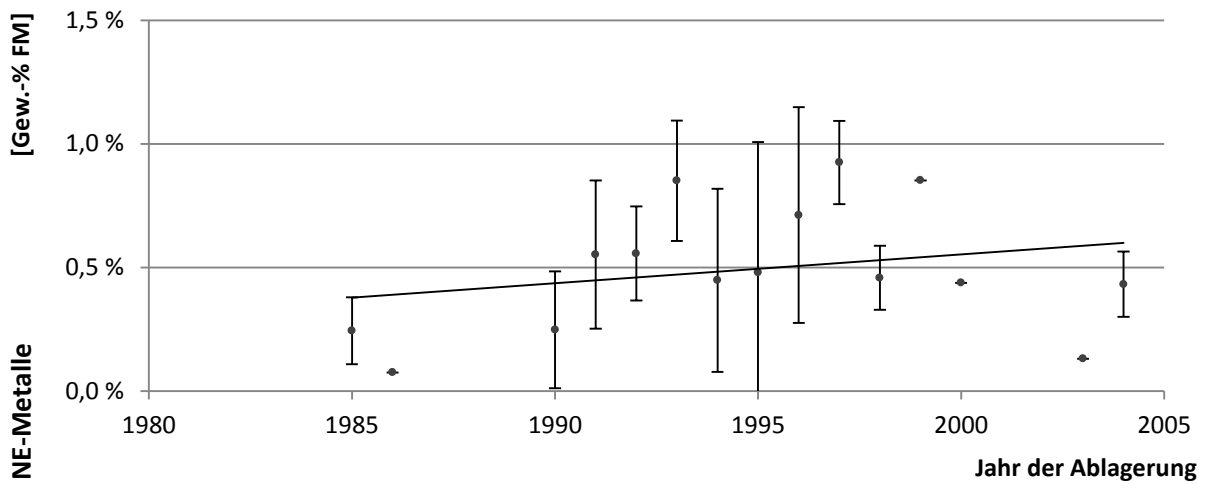
Probenbezeichnung	Einheit	Fe-Metalle	NE-Metalle	PPK	Glas	Kunststoffe	Organik	Holz	Textilien	Mineralstoffe	Verpackungen	Kompl. Produkte	Schadstoffe	Stoffe ang.	Sortierreste > 35 mm	Fraktion < 35 mm
BI/1/1	[Gew.-% FM]	1,3	0,4	0,3	0,1	28,3	0,2	1,8	5,3	2,3	0,0	0,0	0,0	2,3	2,5	55,3
BI/1/2	[Gew.-% FM]	2,5	0,9	2,0	0,5	13,2	0,0	1,9	4,3	3,1	0,1	0,0	0,1	1,5	8,9	61,0
BI/1/3	[Gew.-% FM]	0,7	0,6	0,0	0,0	8,2	0,0	1,5	6,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	11,7	71,1
BI/2/1	[Gew.-% FM]	3,4	0,4	0,1	0,0	8,7	0,0	2,1	7,7	1,0	0,0	0,0	0,1	0,9	4,0	71,7
BI/2/2	[Gew.-% FM]	1,4	0,8	0,2	0,0	15,7	0,0	5,3	3,5	1,1	0,0	0,0	0,0	0,6	3,5	68,0
BI/3/1	[Gew.-% FM]	0,7	1,0	0,8	0,5	12,2	0,0	1,1	5,8	4,0	0,3	0,1	0,0	3,2	14,5	55,8
BI/3/2	[Gew.-% FM]	3,4	1,0	0,0	0,1	12,2	0,0	3,2	8,4	1,2	0,0	0,2	0,0	0,0	24,5	45,7
BI/3/3	[Gew.-% FM]	1,3	0,4	0,0	0,0	6,6	0,0	4,0	8,9	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	77,4
BI/3/4	[Gew.-% FM]	2,3	0,7	0,0	0,1	15,8	0,0	1,6	2,6	1,2	0,5	0,0	0,1	0,1	2,2	72,9
BI/3/5	[Gew.-% FM]	3,3	0,8	0,3	0,1	14,2	0,0	2,8	4,3	0,1	0,0	0,1	0,0	1,1	3,0	70,1
BI/3/6	[Gew.-% FM]	2,4	0,6	0,0	0,0	8,9	0,0	3,2	4,7	1,5	0,1	0,0	0,0	0,2	5,1	73,3
BI/4/1	[Gew.-% FM]	0,5	1,4	0,0	0,1	12,1	0,0	2,8	4,3	4,1	0,2	1,7	0,5	3,2	14,1	55,2
BI/4/2	[Gew.-% FM]	0,6	0,2	0,0	0,0	4,7	0,0	1,1	0,9	3,3	0,1	0,0	0,0	1,6	1,5	86,1
BI/4/3	[Gew.-% FM]	0,9	1,1	0,3	0,1	8,8	0,0	1,8	9,0	2,1	0,1	0,0	0,0	1,2	1,6	72,8
BI/4/4	[Gew.-% FM]	2,3	0,3	0,6	0,1	12,4	0,0	4,6	5,3	0,5	0,4	0,0	0,0	0,7	14,4	58,5
BI/4/5	[Gew.-% FM]	1,2	0,4	0,0	0,1	21,2	0,0	2,9	8,7	0,4	0,1	0,5	0,0	1,2	10,9	52,4
BI/5/1	[Gew.-% FM]	1,0	0,6	0,0	0,0	4,8	0,0	0,7	7,2	6,4	0,1	0,0	0,0	0,5	13,4	65,4
BI/5/2	[Gew.-% FM]	1,5	0,9	0,7	0,1	10,1	0,1	2,1	2,2	4,7	1,1	0,0	0,0	0,9	9,1	66,6
BI/5/3	[Gew.-% FM]	0,6	0,3	0,9	0,1	12,8	0,0	3,1	9,7	4,6	0,3	0,0	0,2	1,0	11,8	54,7
BI/6/1	[Gew.-% FM]	1,6	0,1	0,8	0,2	16,2	0,0	3,4	5,8	2,5	0,0	0,0	0,0	0,2	8,8	60,4
BI/6/2	[Gew.-% FM]	2,8	0,3	0,0	0,1	12,7	0,0	5,1	2,4	5,7	0,0	0,0	0,0	0,4	9,8	60,7
BII/1/1	[Gew.-% FM]	1,3	0,3	0,0	0,2	3,7	0,0	0,4	11,2	12,0	0,0	0,3	0,0	0,0	7,9	62,7
BII/1/2	[Gew.-% FM]	2,5	0,5	0,0	0,1	10,7	0,0	1,9	9,4	9,5	0,1	0,0	0,0	0,0	3,0	62,3
BII/1/3	[Gew.-% FM]	2,9	0,1	0,0	0,0	4,7	0,0	0,7	5,8	1,5	0,1	0,0	0,0	0,0	1,7	82,4
BII/1/4	[Gew.-% FM]	2,2	0,4	0,0	0,0	8,3	0,0	0,5	3,3	5,2	0,0	0,0	0,0	0,0	2,8	77,3
BII/1/5	[Gew.-% FM]	1,4	0,3	0,0	0,1	19,1	0,0	0,7	6,6	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	69,9
BII/1/6	[Gew.-% FM]	1,2	0,3	0,0	0,0	11,8	0,0	2,4	6,1	1,4	0,0	0,3	0,0	0,0	4,1	72,3
BII/1/7	[Gew.-% FM]	3,2	0,7	0,0	0,2	9,8	0,0	1,2	3,9	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	7,4	71,4
BII/1/8	[Gew.-% FM]	2,8	0,8	0,0	0,0	13,2	0,0	1,1	5,2	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	5,3	69,3
BII/1/9	[Gew.-% FM]	5,0	0,4	0,1	0,0	22,0	0,0	2,8	7,3	4,7	0,2	0,0	0,0	0,0	1,4	56,1
BII/1/10	[Gew.-% FM]	2,6	0,5	0,4	0,1	7,2	0,0	0,8	8,6	0,2	0,0	0,9	0,0	0,0	7,8	71,1
BII/2/1	[Gew.-% FM]	1,5	0,3	0,7	1,0	18,0	0,0	1,7	14,1	19,4	0,0	0,0	0,0	0,0	20,5	22,9
BII/3/1	[Gew.-% FM]	1,1	0,0	0,0	1,8	0,3	0,0	0,1	0,0	3,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	92,9
BII/3/2	[Gew.-% FM]	2,5	0,0	0,0	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	2,4	0,0	0,0	0,3	0,0	5,1	89,2
BII/3/3	[Gew.-% FM]	0,7	0,1	0,7	2,4	5,2	0,0	2,2	6,3	8,4	0,0	0,1	0,0	0,0	17,3	56,7

ANHANG 68: MITTLERE ZUSAMMENSETZUNG DES DEPONIEGUTS DER IN-SITU SORTIERUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER NACHSORTIERUNG DER SORTIERRESTE NACH BOHRSTAFFELN

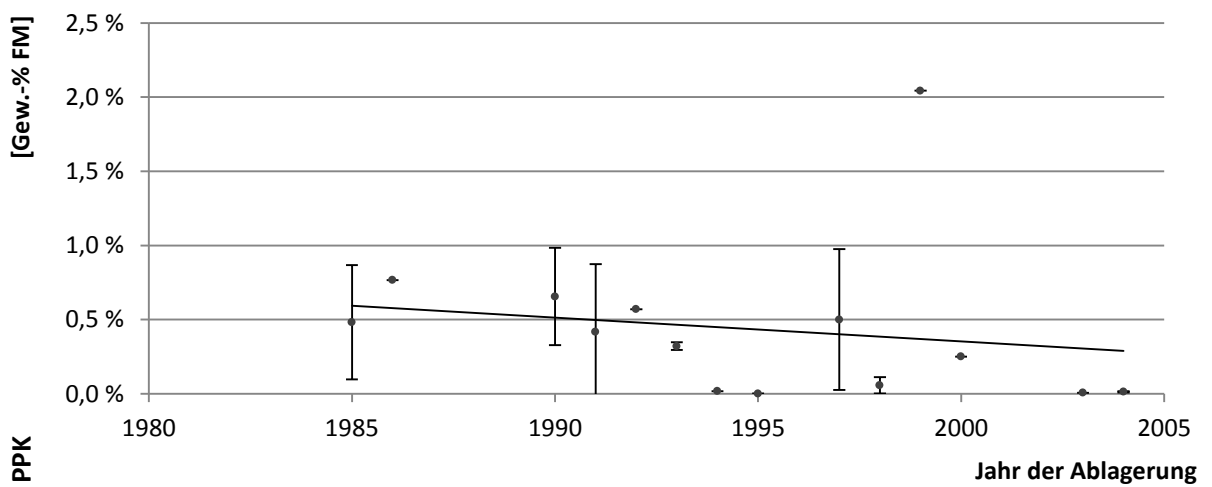
Betrachtungsebene	Einheit	Fe-Metalle	NE-Metalle	PPK	Glas	Kunststoffe	Organik	Holz	Textilien	Mineralstoffe	Verpackungen	Kompl. Produkte	Schadstoffe	Stoffe ang.	Sortierreste > 35 mm	Fraktion < 35 mm
MW Bohrstaffel I	[Gew.-% FM]	1,68	0,62	0,34	0,11	12,38	0,01	2,67	5,56	2,40	0,16	0,13	0,05	1,00	8,36	64,53
MW Bohrstaffel II	[Gew.-% FM]	2,21	0,34	0,14	0,45	9,57	0,00	1,17	6,26	5,32	0,03	0,11	0,03	0,00	6,06	68,32
MW aus MW I und MW II	[Gew.-% FM]	1,95	0,48	0,24	0,28	10,97	0,01	1,92	5,91	3,86	0,09	0,12	0,04	0,50	7,21	66,42
MW Gesamtbetrachtung	[Gew.-% FM]	1,90	0,51	0,26	0,25	11,25	0,01	2,07	5,84	3,57	0,11	0,12	0,04	0,60	7,44	66,04



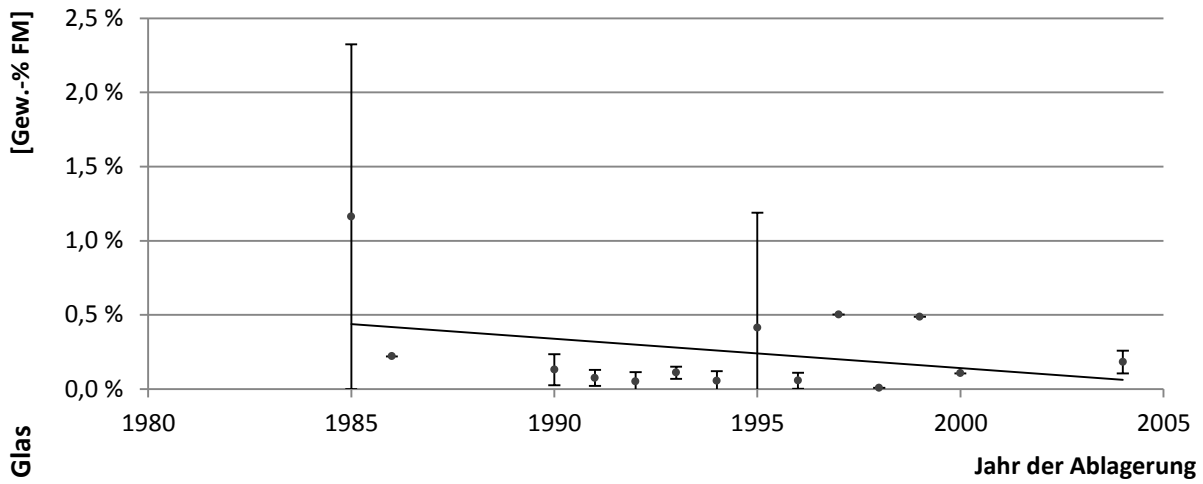
ANHANG 69: MITTLERE JAHRESSPEZIFISCHE GEHALTE AN FE-METALLEN UND DEREN STANDARDABWEICHUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER GESAMTUNTERSUCHUNGSMASSE



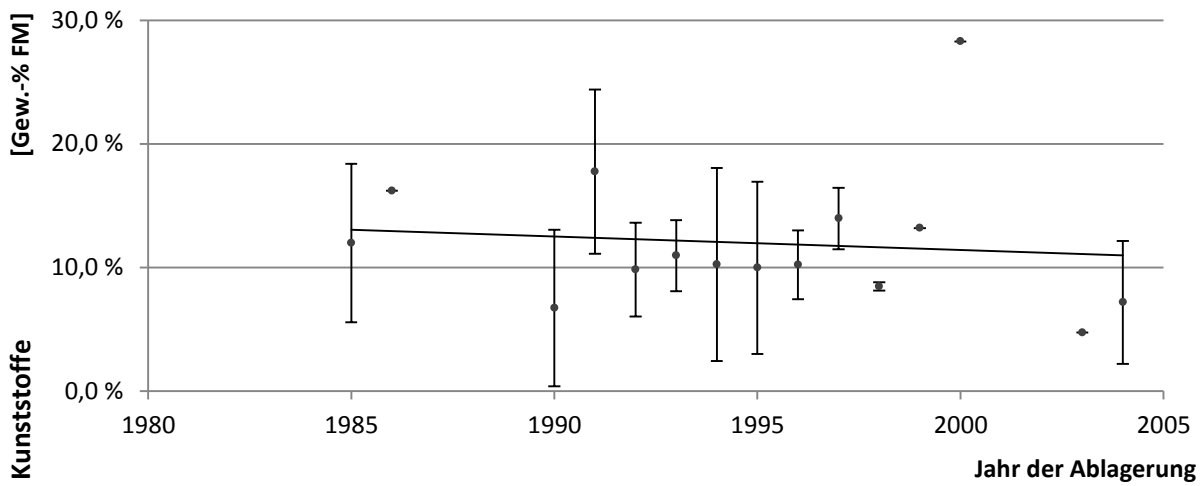
ANHANG 70: MITTLERE JAHRESSPEZIFISCHE GEHALTE AN NE-METALLEN UND DEREN STANDARDABWEICHUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER GESAMTUNTERSUCHUNGSMASSE



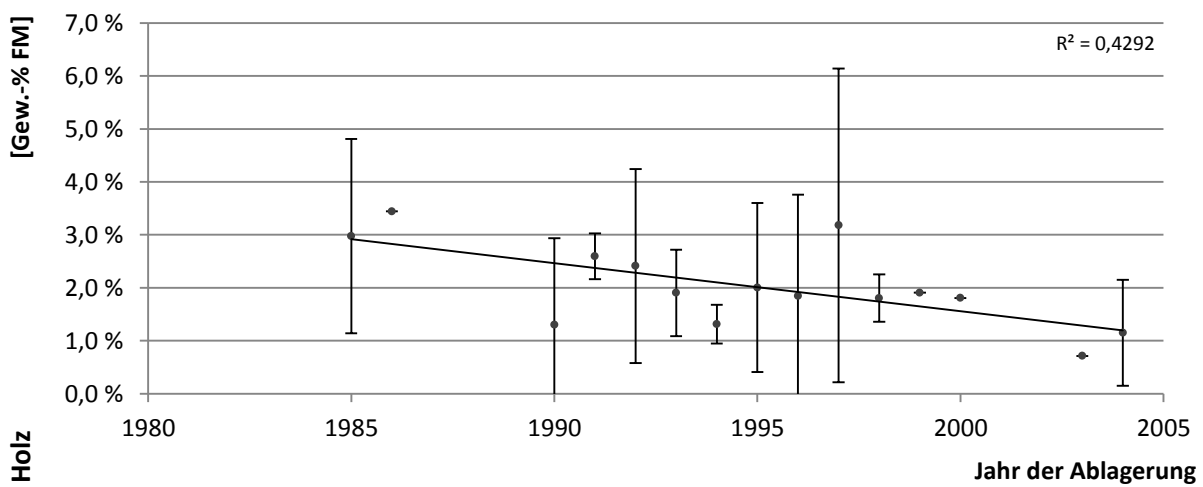
ANHANG 71: MITTLERE JAHRESSPEZIFISCHE GEHALTE AN PPK UND DEREN STANDARDABWEICHUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER GESAMTUNTERSUCHUNGSMASSE



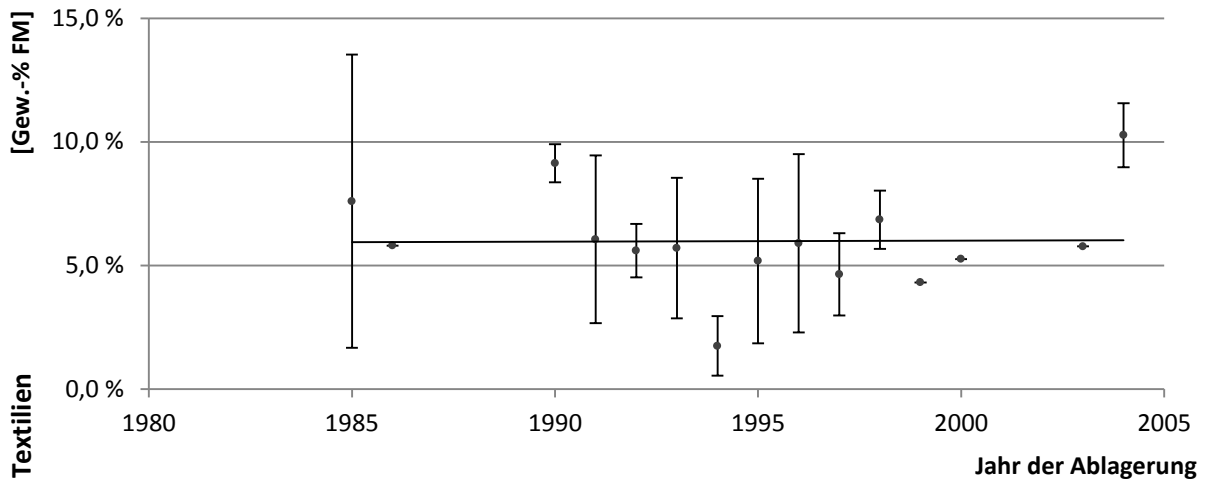
ANHANG 72: MITTLERE JAHRESSPEZIFISCHE GEHALTE AN GLAS UND DEREN STANDARDABWEICHUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER GESAMTUNTERSUCHUNGSMASSE



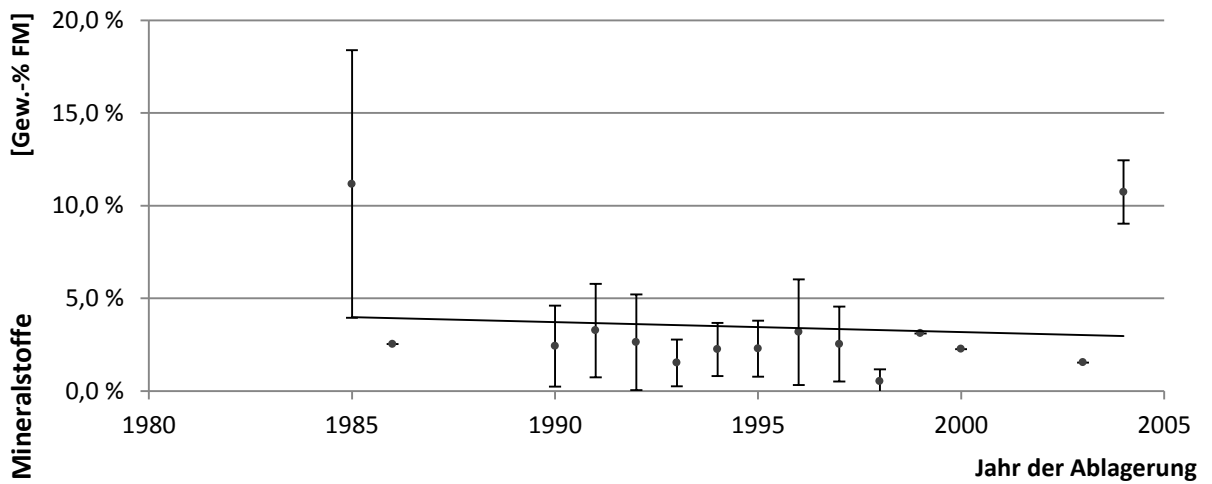
ANHANG 73: MITTLERE JAHRESSPEZIFISCHE GEHALTE AN KUNSTSTOFFEN UND DEREN STANDARDABWEICHUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER GESAMTUNTERSUCHUNGSMASSE



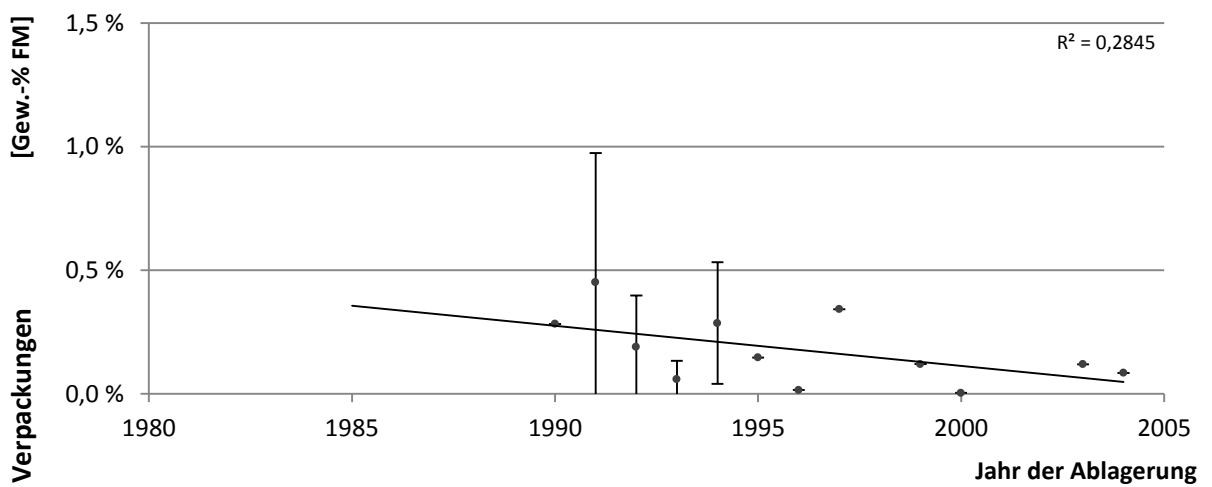
ANHANG 74: MITTLERE JAHRESSPEZIFISCHE GEHALTE AN HOLZ UND DEREN STANDARDABWEICHUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER GESAMTUNTERSUCHUNGSMASSE



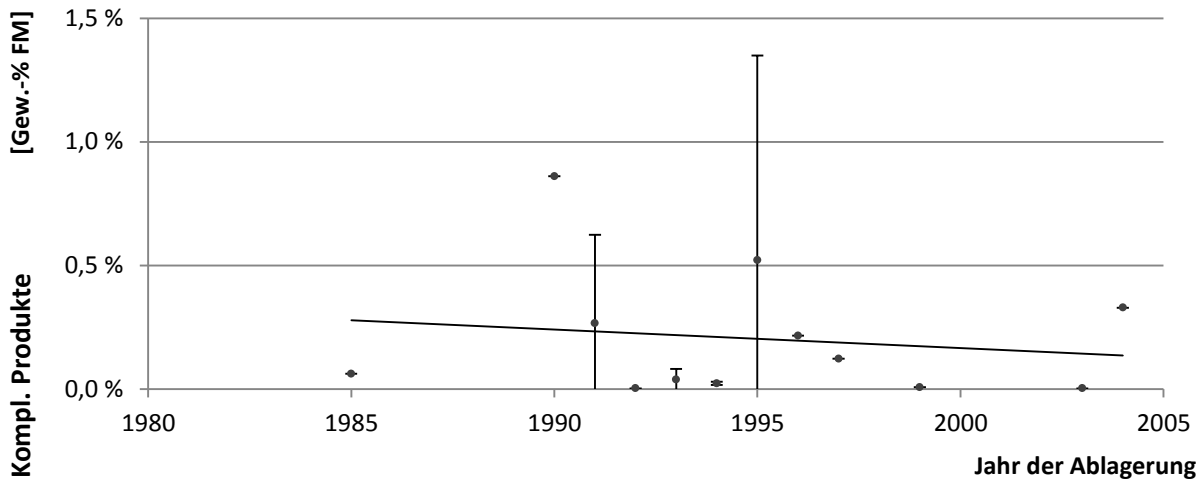
ANHANG 75: MITTLERE JAHRESSPEZIFISCHE GEHALTE AN TEXTILIEN UND DEREN STANDARDABWEICHUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER GESAMTUNTERSUCHUNGSMASSE



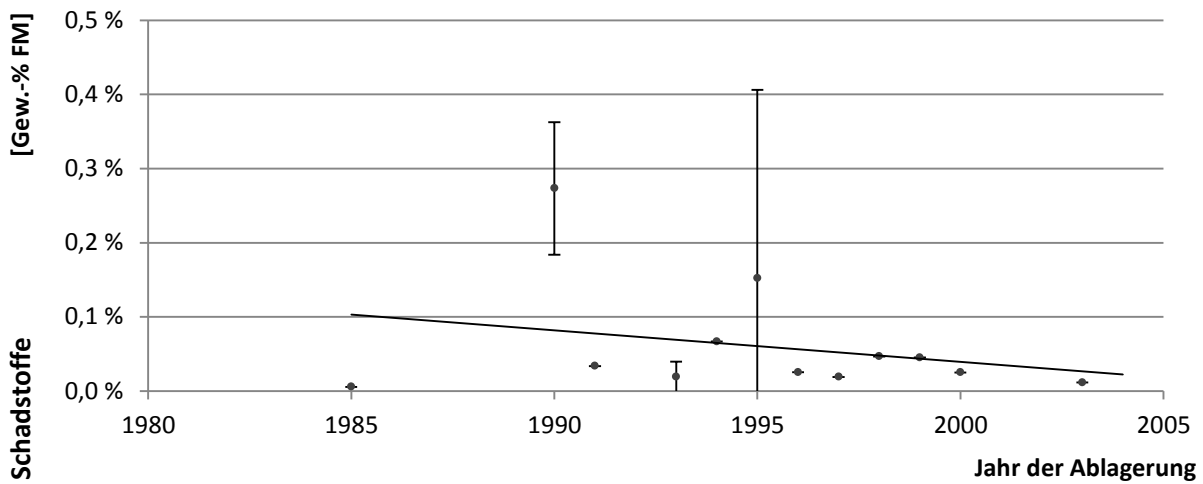
ANHANG 76: MITTLERE JAHRESSPEZIFISCHE GEHALTE AN MINERALSTOFFEN UND DEREN STANDARDABWEICHUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER GESAMTUNTERSUCHUNGSMASSE



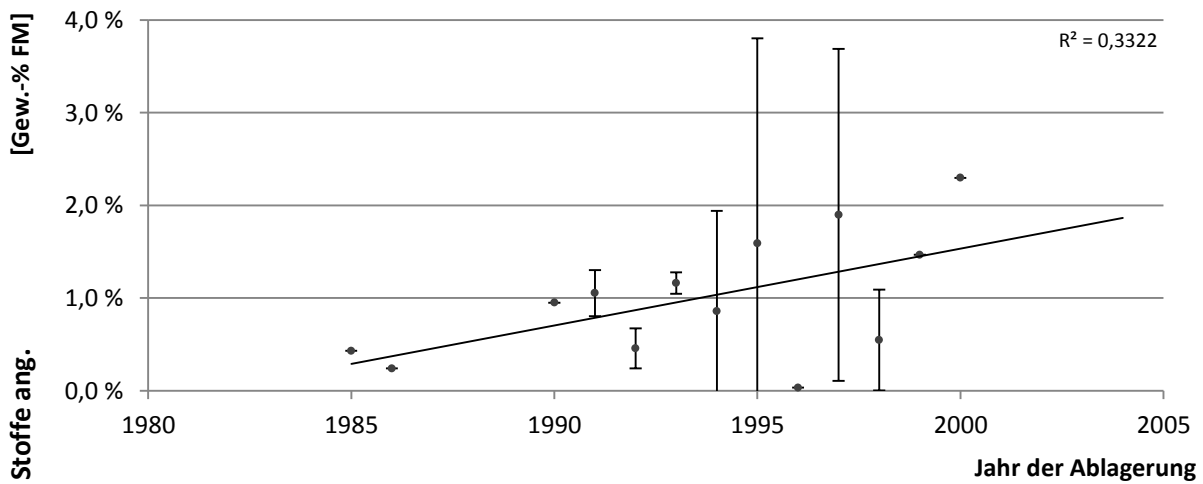
ANHANG 77: MITTLERE JAHRESSPEZIFISCHE GEHALTE AN VERPACKUNGEN UND DEREN STANDARDABWEICHUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER GESAMTUNTERSUCHUNGSMASSE



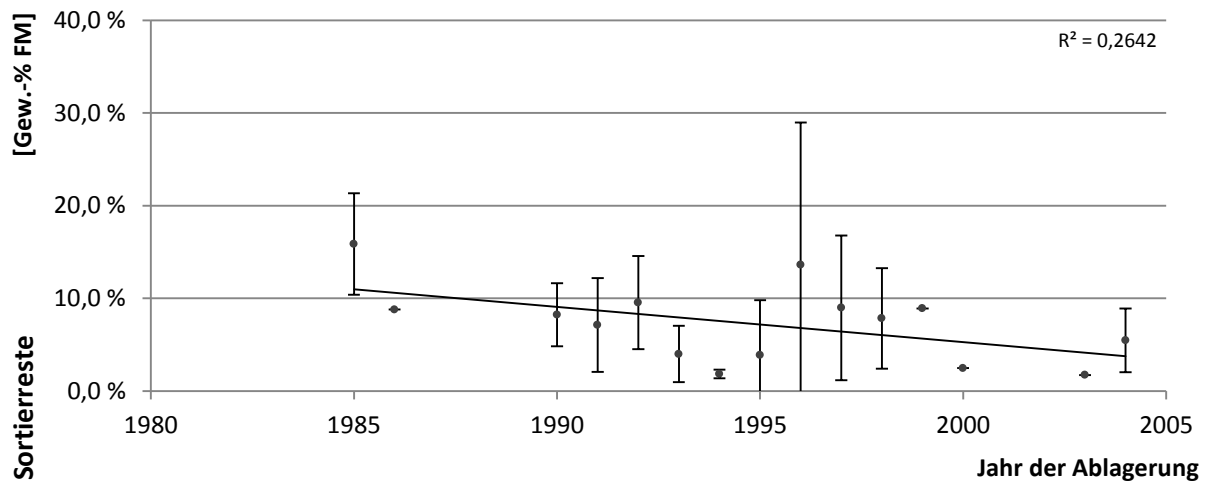
ANHANG 78: MITTLERE JAHRESSPEZIFISCHE GEHALTE AN KOMPL. PRODUKTEN UND DEREN STANDARDABWEICHUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER GESAMTUNTERSUCHUNGSMASSE



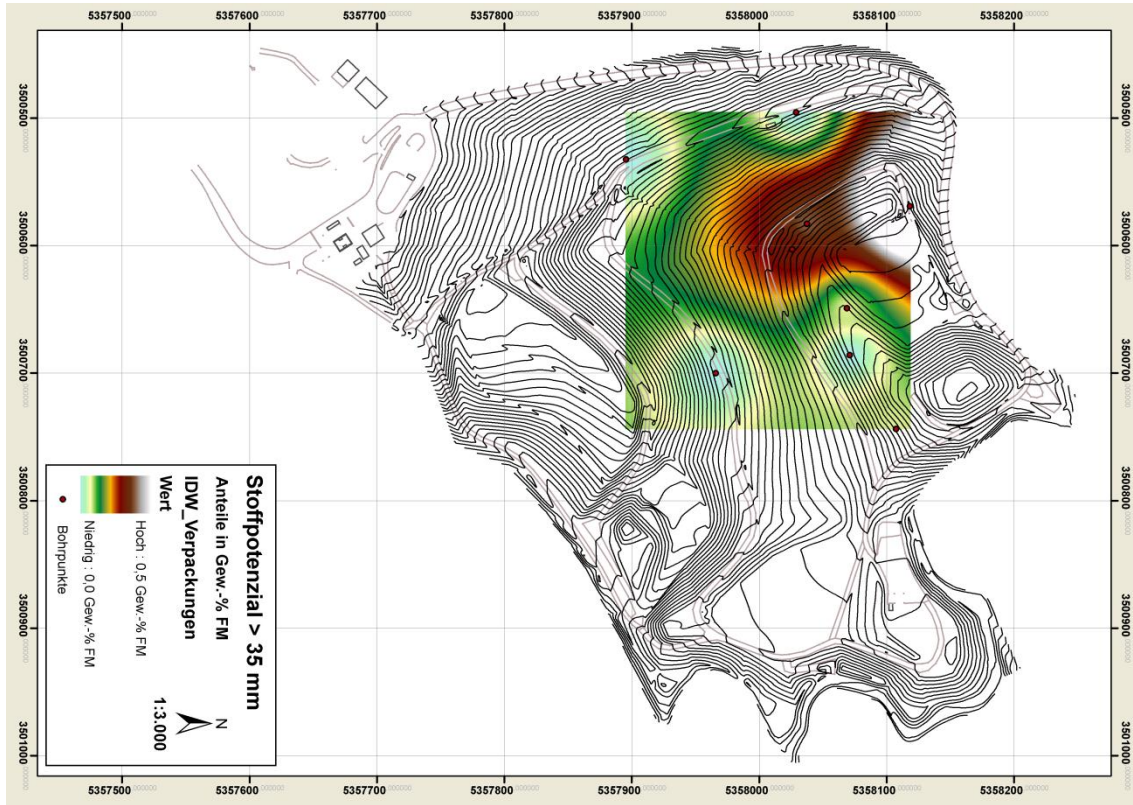
ANHANG 79: MITTLERE JAHRESSPEZIFISCHE GEHALTE AN SCHADSTOFFEN UND DEREN STANDARDABWEICHUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER GESAMTUNTERSUCHUNGSMASSE



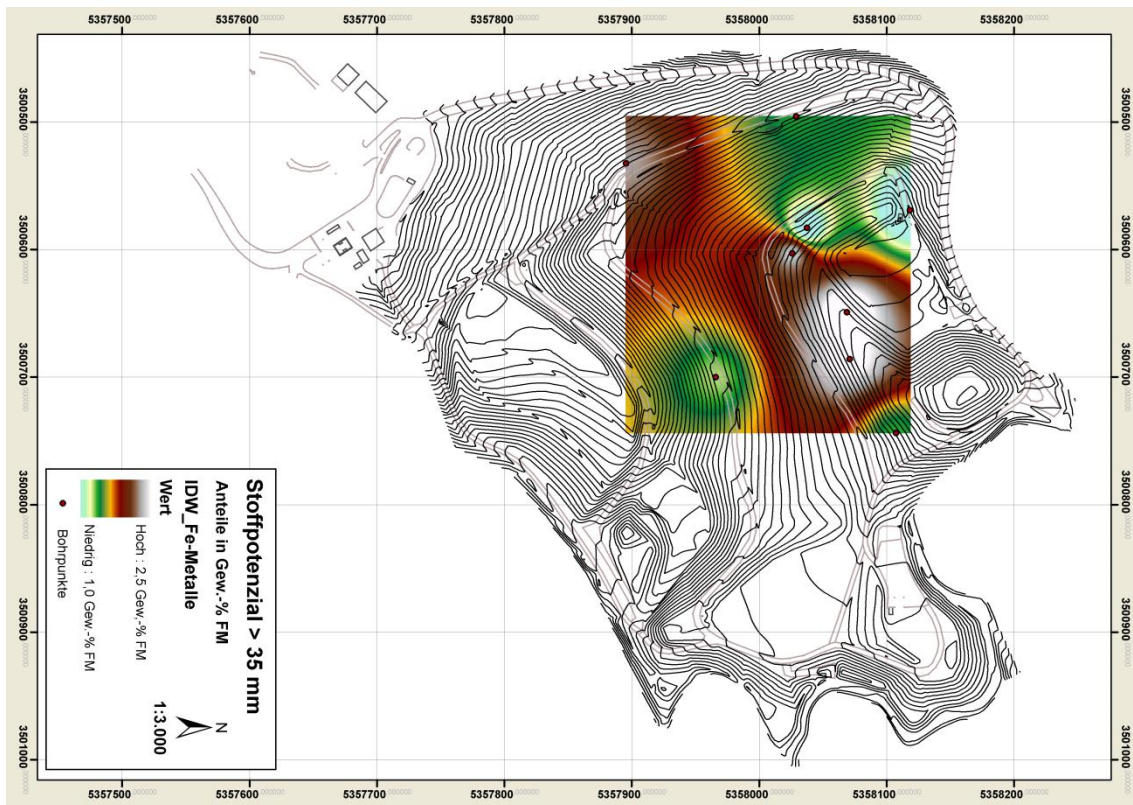
ANHANG 80: MITTLERE JAHRESSPEZIFISCHE GEHALTE AN STOFFEN ANG. UND DEREN STANDARDABWEICHUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER GESAMTUNTERSUCHUNGSMASSE



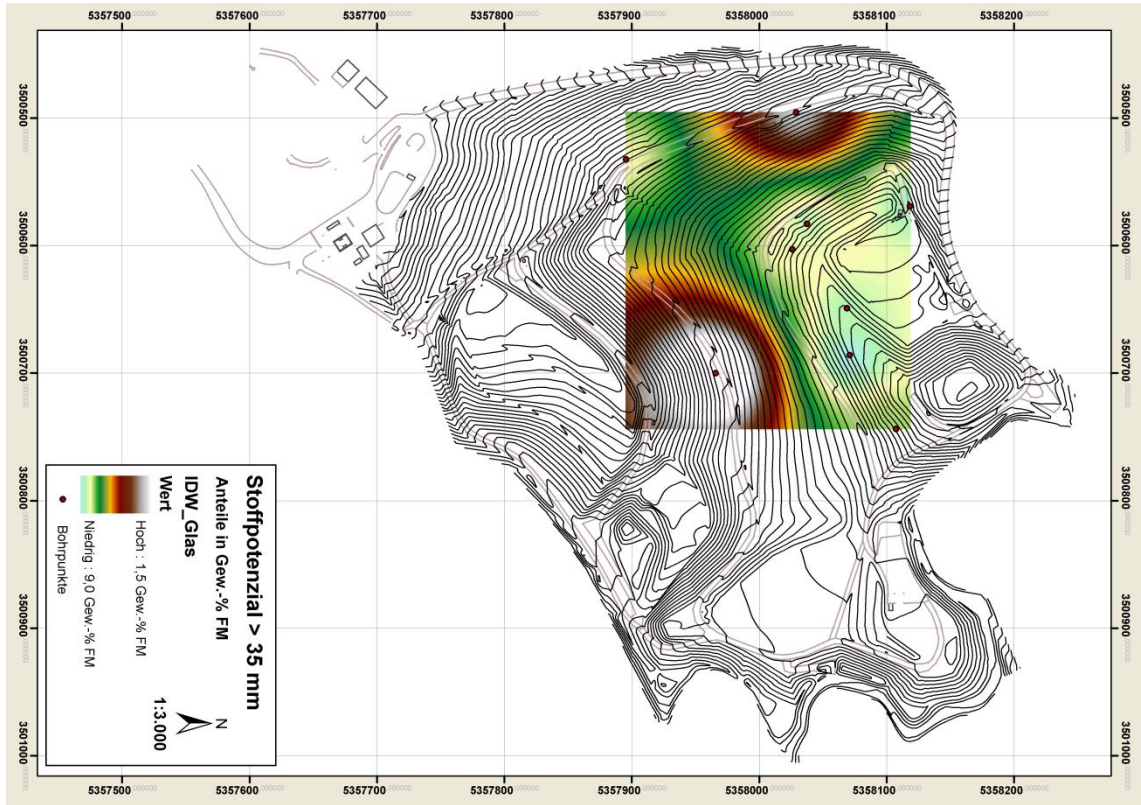
ANHANG 81: MITTLERE JAHRESSPEZIFISCHE GEHALTE AN SORTIERRESTEN UND DEREN STANDARDABWEICHUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER GESAMTUNTERSUCHUNGSMASSE



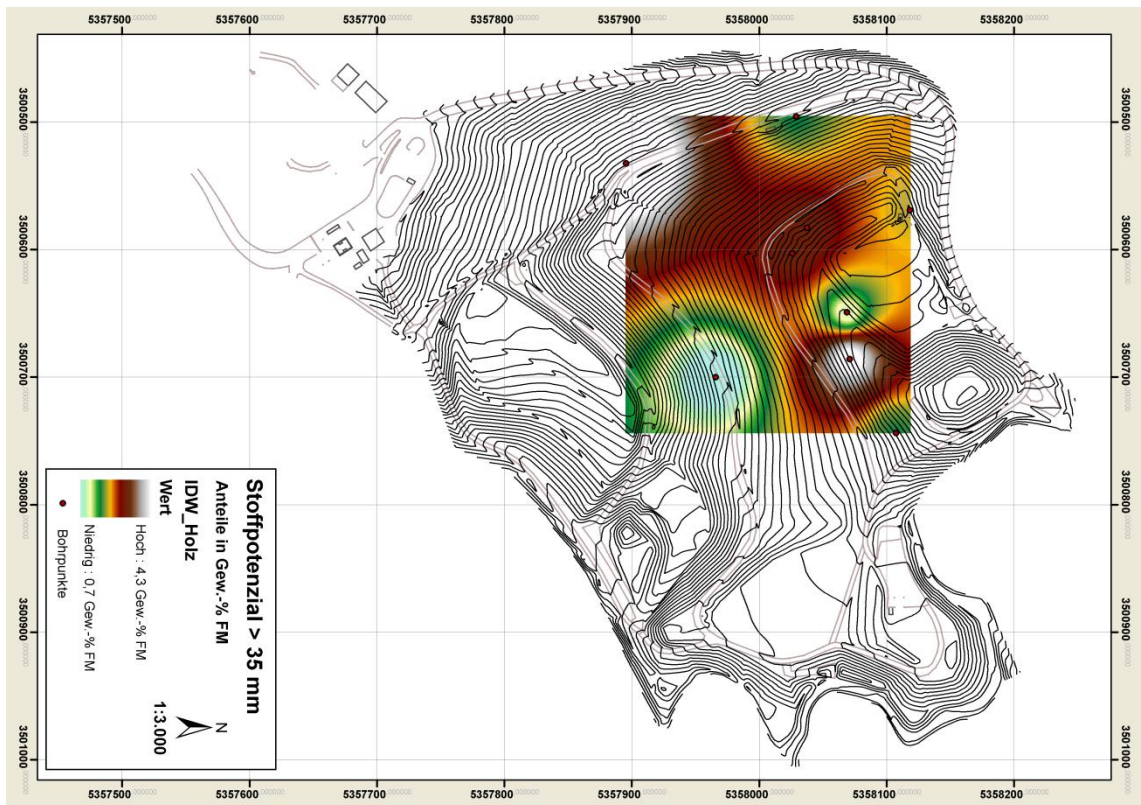
ANHANG 82: MITTLERE RÄUMLICHE VERTEILUNG DER GEHALTE AN VERPACKUNGEN | IN-SITU SORTIERUNG



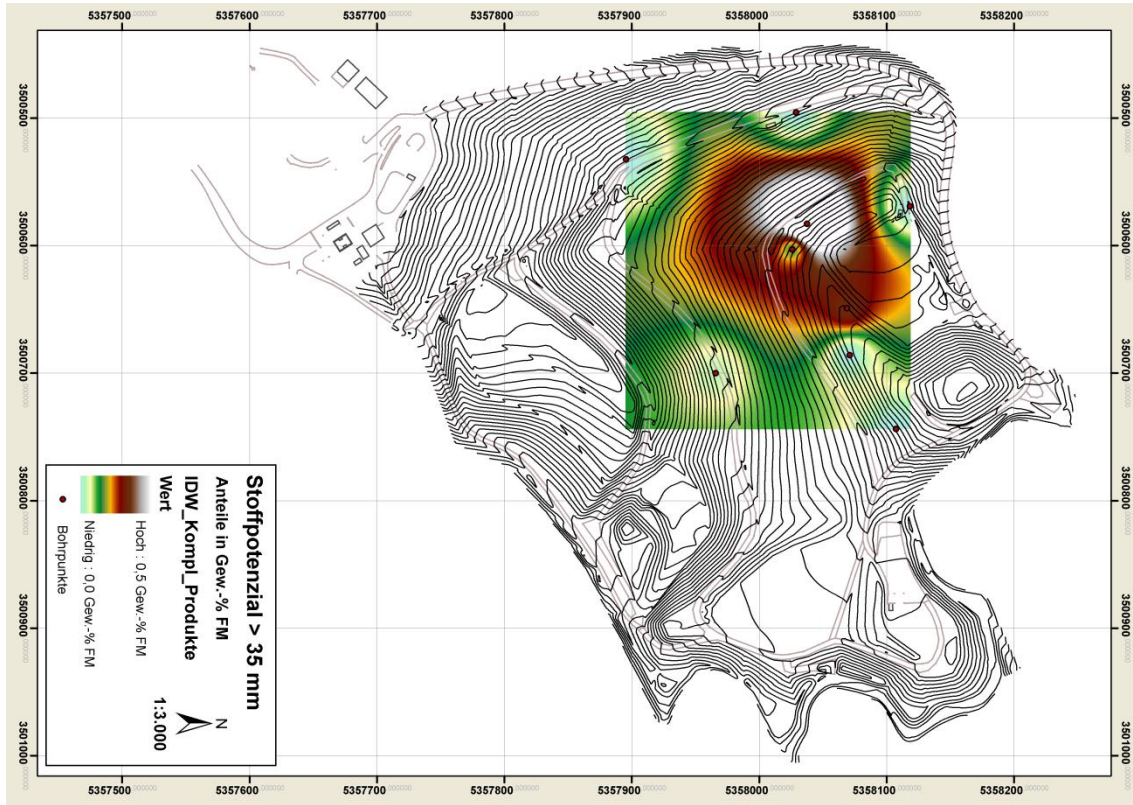
ANHANG 83: MITTLERE RÄUMLICHE VERTEILUNG DER GEHALTE AN FE-METALLEN | IN-SITU SORTIERUNG



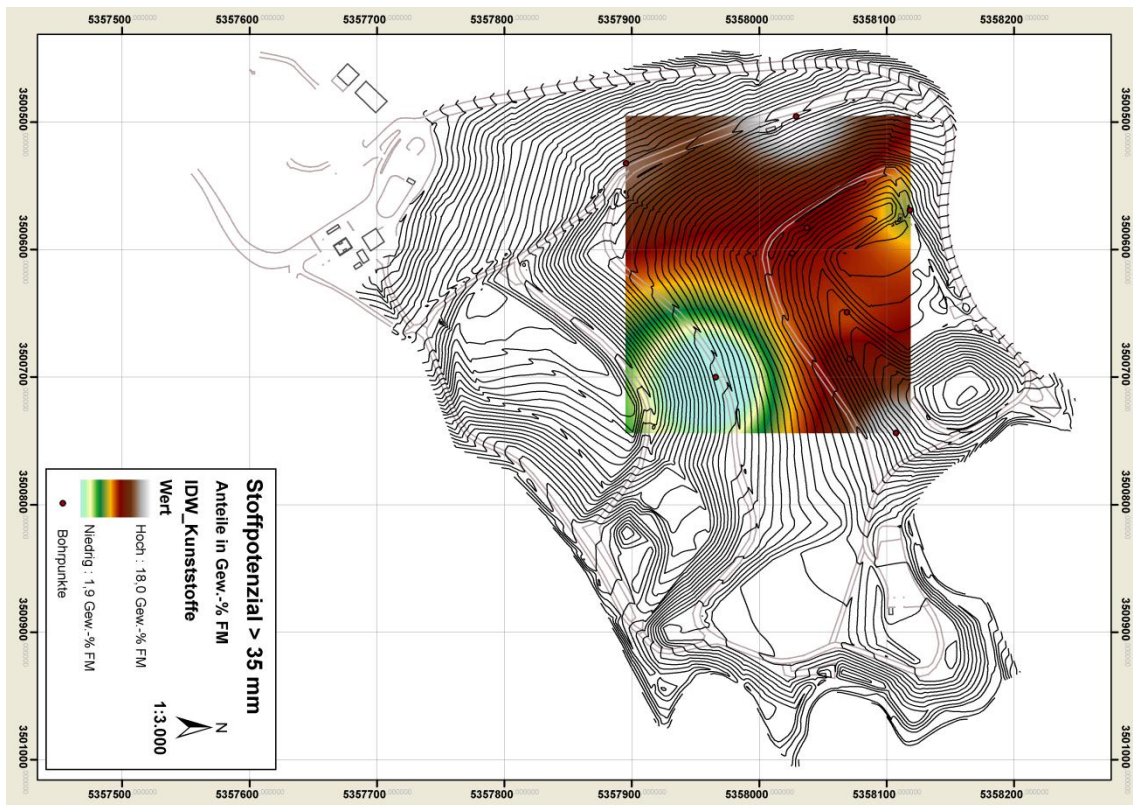
ANHANG 84: MITTLERE RÄUMLICHE VERTEILUNG DER GEHALTE AN GLAS | IN-SITU SORTIERUNG



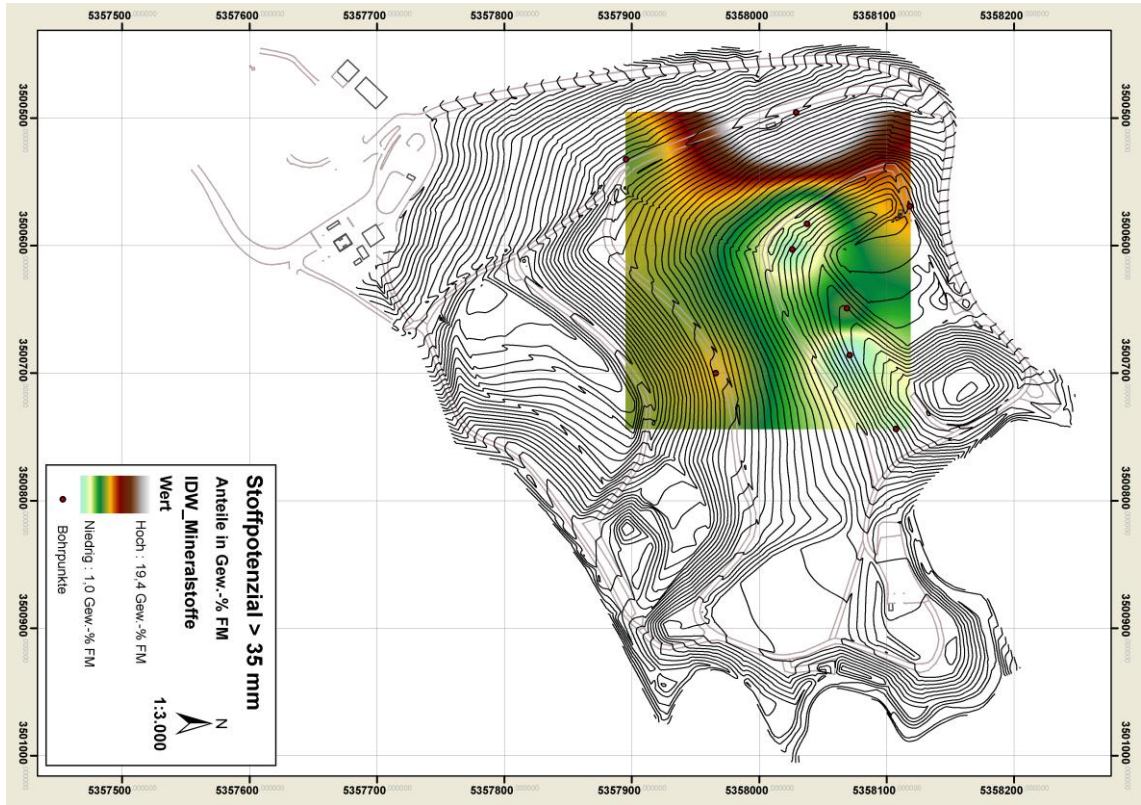
ANHANG 85: MITTLERE RÄUMLICHE VERTEILUNG DER GEHALTE AN HOLZ | IN-SITU SORTIERUNG



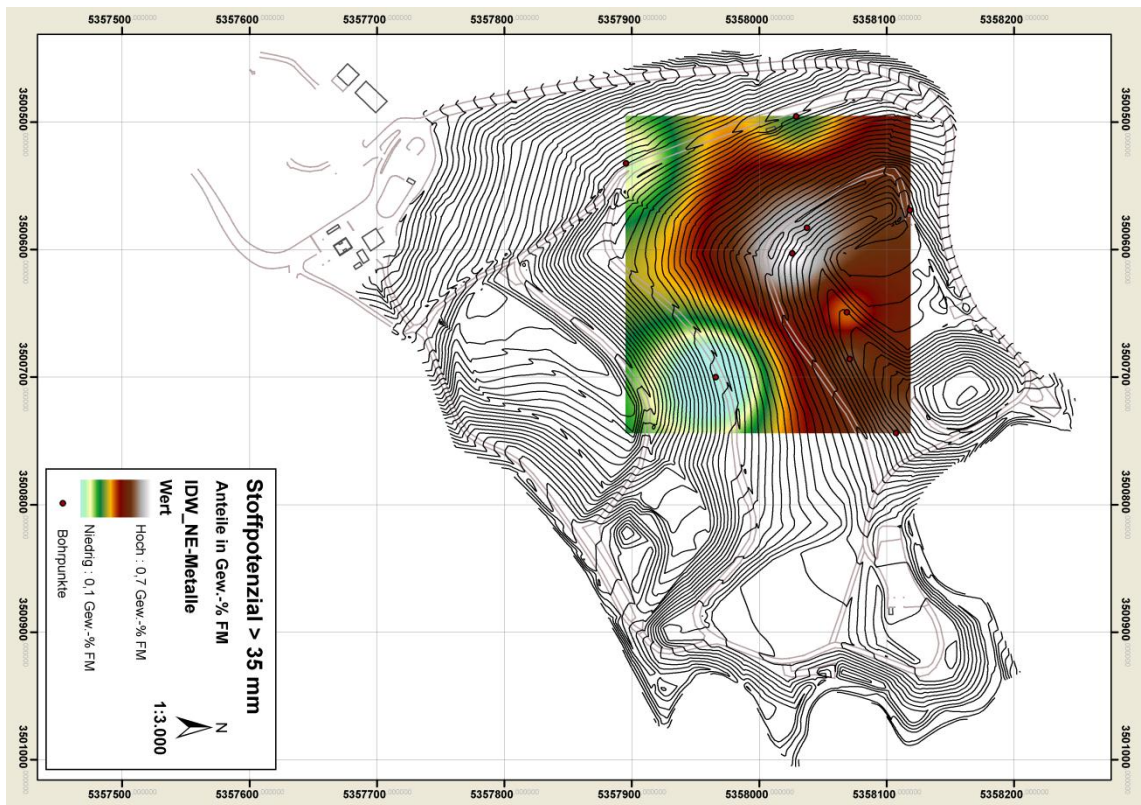
ANHANG 86: MITTLERE RÄUMLICHE VERTEILUNG DER GEHALTE AN KOMPLEXEN PRODUKTEN | IN-SITU SORTIERUNG



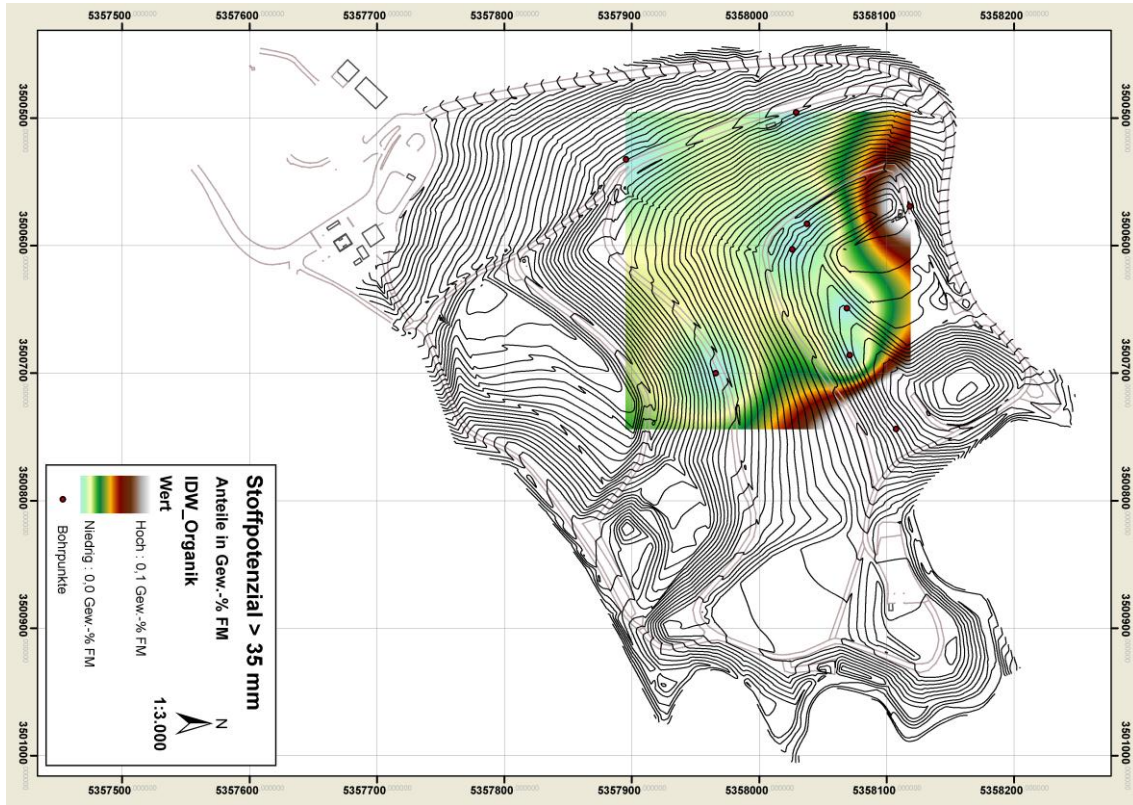
ANHANG 87: MITTLERE RÄUMLICHE VERTEILUNG DER GEHALTE AN KUNSTSTOFFEN | IN-SITU SORTIERUNG



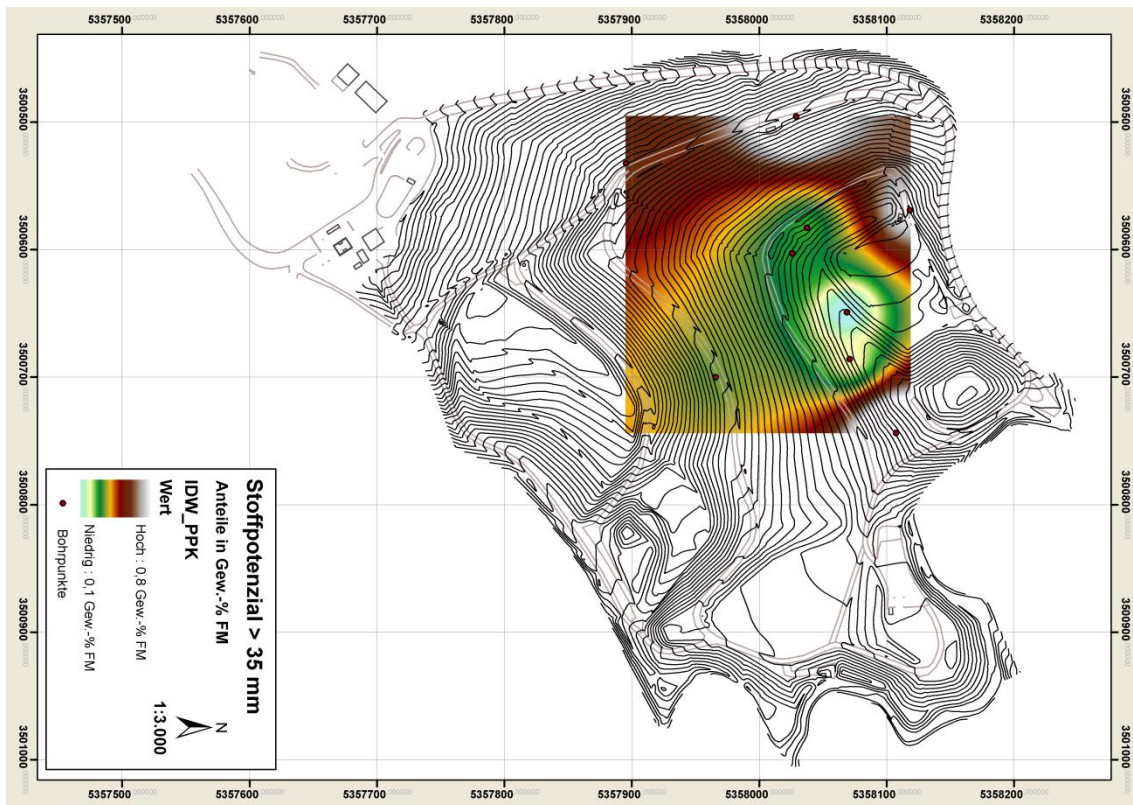
ANHANG 88: MITTLERE RÄUMLICHE VERTEILUNG DER GEHALTE AN MINERALSTOFFEN | IN-SITU SORTIERUNG



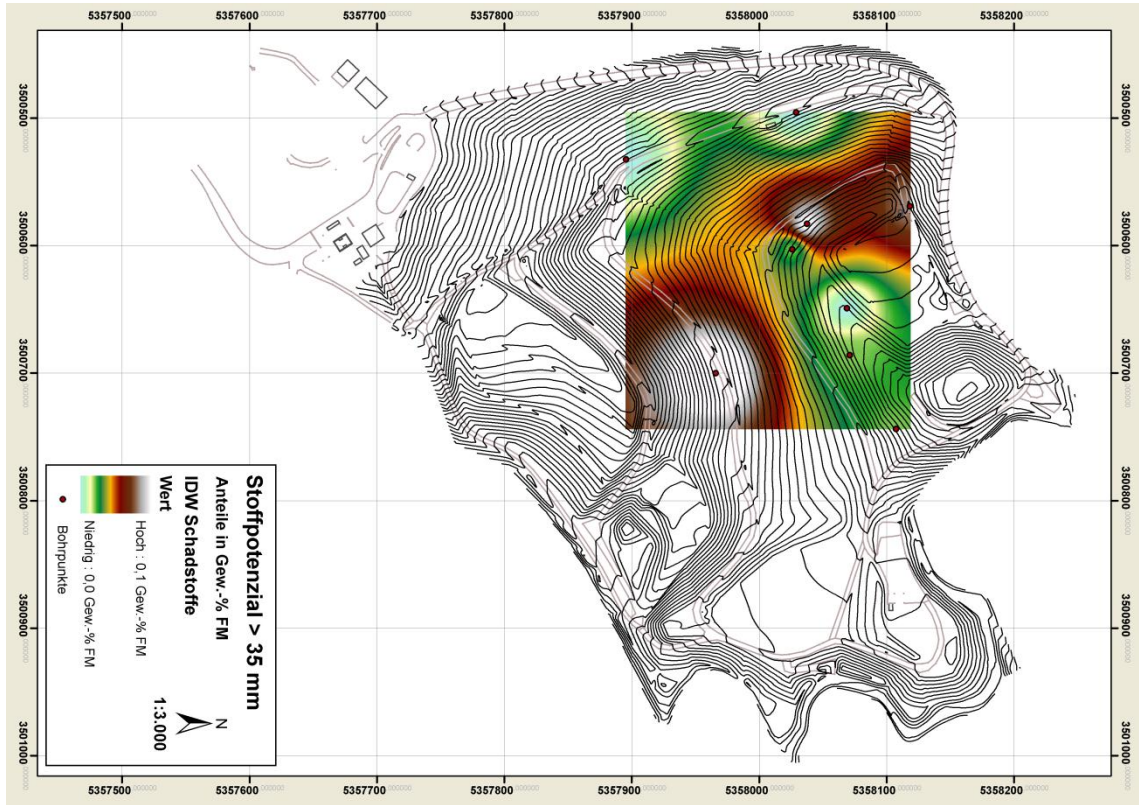
ANHANG 89: MITTLERE RÄUMLICHE VERTEILUNG DER GEHALTE AN NE-METALLEN | IN-SITU SORTIERUNG



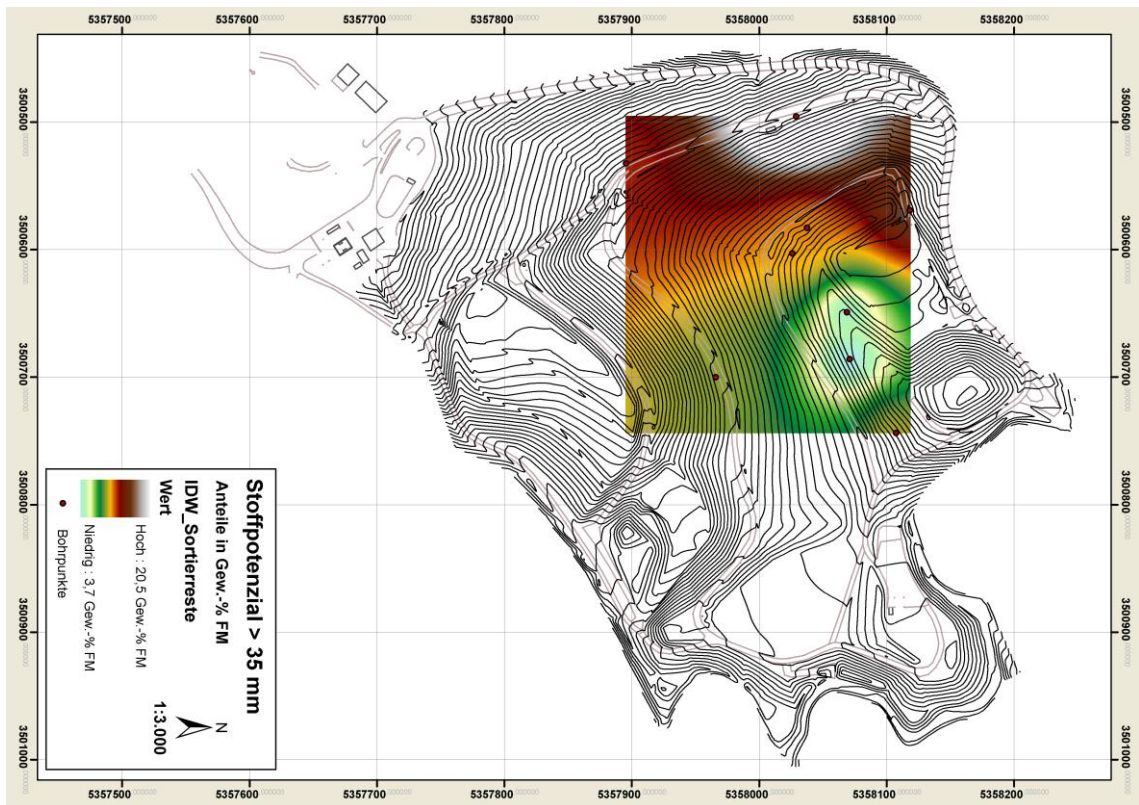
ANHANG 90: MITTLERE RÄUMLICHE VERTEILUNG DER GEHALTE AN ORGANIK | IN-SITU SORTIERUNG



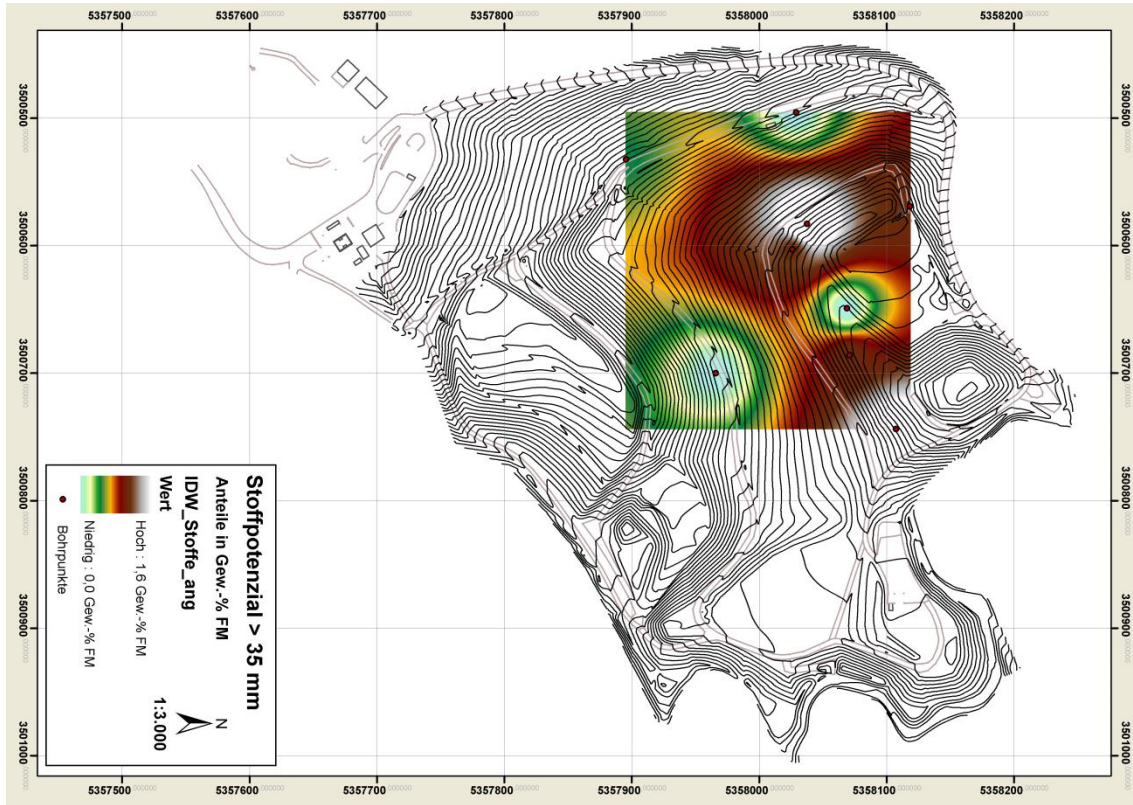
ANHANG 91: MITTLERE RÄUMLICHE VERTEILUNG DER GEHALTE AN PPK | IN-SITU SORTIERUNG



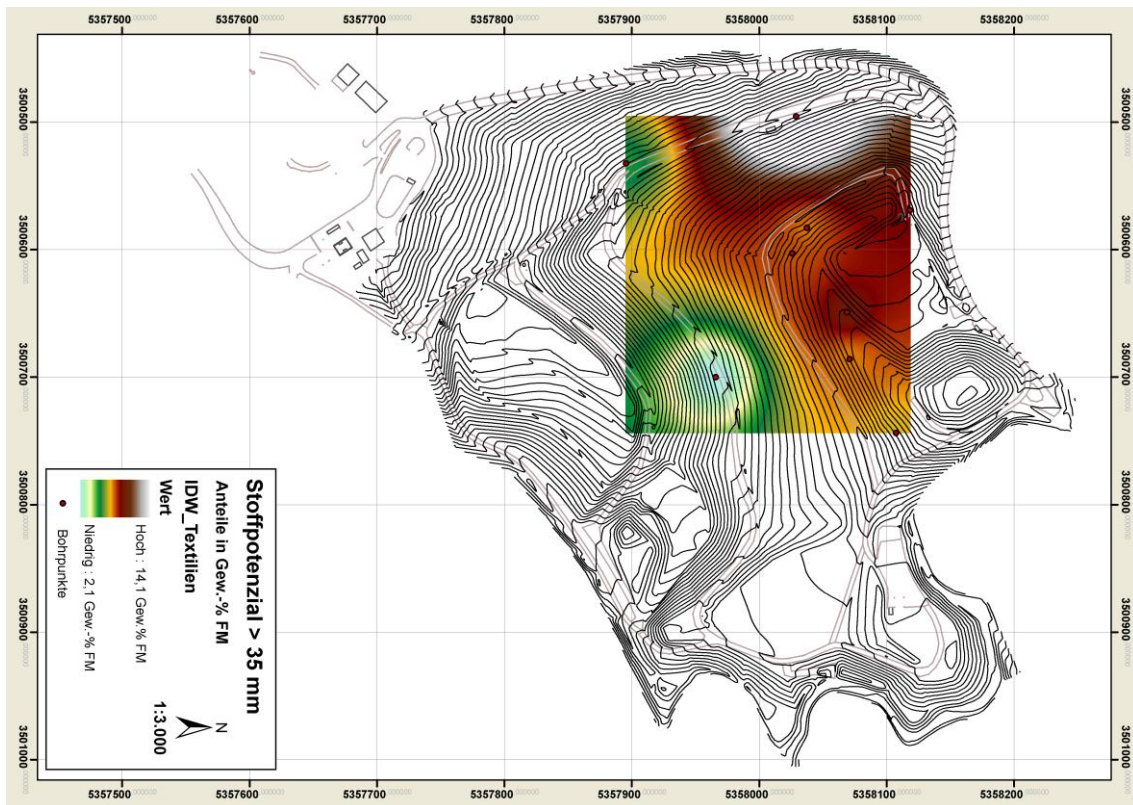
ANHANG 92: MITTLERE RÄUMLICHE VERTEILUNG DER GEHALTE AN SCHADSTOFFEN | IN-SITU SORTIERUNG



ANHANG 93: MITTLERE RÄUMLICHE VERTEILUNG DER GEHALTE AN SORTIERRESTEN | IN-SITU SORTIERUNG



ANHANG 94: MITTLERE RÄUMLICHE VERTEILUNG DER GEHALTE AN STOFFEN ANG. | IN-SITU SORTIERUNG



ANHANG 95: MITTLERE RÄUMLICHE VERTEILUNG DER GEHALTE AN TEXTILIEN | IN-SITU SORTIERUNG

ANHANG 96: ZUSAMMENSETZUNG DER FRAKTION < 35 MM IN BEZUG ZUR GESAMTMASSE < 35 MM

Probenbezeichnung	Einheit	Fe-Metalle	NE-Metalle	PPK	Glas	Kunststoffe	Organik	Holz	Textilien	Mineralstoffe	Verpackungen	Kompl. Produkte	Schadstoffe	Stoffe ang.	Sortierreste	Fraktion < 5 mm
BI/1/1	[Gew.-% TM]	1,6	0,4	0,0	6,1	24,8	0,0	0,0	0,0	11,1	0,0	0,0	0,0	0,0	19,4	36,7
BI/1/2	[Gew.-% TM]	0,6	0,2	0,0	4,7	15,8	0,0	1,4	1,2	12,1	0,0	0,0	0,0	0,0	41,7	22,4
BI/1/3	[Gew.-% TM]	2,6	0,4	0,0	4,9	16,9	0,0	0,7	2,9	23,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,1	43,6
BI/2/1	[Gew.-% TM]	0,4	0,0	0,0	1,6	13,0	0,0	2,3	6,3	12,7	0,0	0,0	0,0	0,0	44,7	19,0
BI/2/2	[Gew.-% TM]	1,9	0,0	0,0	5,3	11,8	0,0	1,7	3,4	7,3	0,0	0,0	0,0	0,0	12,8	55,8
BI/3/1	[Gew.-% TM]	1,3	0,0	0,0	7,2	6,1	0,0	1,0	2,2	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5	71,8
BI/3/2	[Gew.-% TM]	1,0	1,3	0,0	6,6	12,0	0,0	2,6	3,3	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	55,9	7,9
BI/3/3	[Gew.-% TM]	4,6	0,1	0,0	1,7	11,8	0,0	3,4	10,1	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	30,7	27,6
BI/3/4	[Gew.-% TM]	1,1	0,0	0,0	5,0	7,4	0,0	1,9	6,0	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	21,9	53,5
BI/3/5	[Gew.-% TM]	1,2	0,0	0,0	8,4	11,6	0,0	0,9	3,2	8,3	0,0	0,0	0,0	0,0	12,2	54,2
BI/3/6	[Gew.-% TM]	1,1	0,0	0,0	5,7	10,3	0,0	4,0	1,0	11,0	0,0	0,0	0,0	0,0	37,8	29,2
BI/4/1	[Gew.-% TM]	0,5	0,1	0,0	19,1	13,8	0,0	0,0	0,0	17,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	48,3
BI/4/2	[Gew.-% TM]	0,0	0,0	0,0	0,6	1,4	0,0	0,9	0,4	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	7,6	85,8
BI/4/3	[Gew.-% TM]	0,0	0,1	0,0	11,1	9,2	0,0	0,7	2,3	11,1	0,0	0,0	0,0	0,0	24,5	40,9
BI/4/4	[Gew.-% TM]	0,9	0,1	0,0	8,4	8,5	0,0	2,1	1,9	6,8	0,0	0,0	0,0	0,0	21,6	49,8
BI/4/5	[Gew.-% TM]	2,4	0,0	0,0	5,7	8,0	0,0	2,6	2,2	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	46,4	24,7
BI/5/1	[Gew.-% TM]	0,0	0,0	0,0	1,7	11,3	0,0	0,7	3,5	15,3	0,0	0,0	0,0	0,0	42,0	25,4
BI/5/2	[Gew.-% TM]	0,0	0,0	0,0	10,9	6,5	0,0	1,9	1,5	20,6	0,0	0,0	0,0	0,0	27,9	30,6
BI/5/3	[Gew.-% TM]	0,9	0,3	0,0	7,5	6,7	0,0	2,4	2,5	9,3	0,0	0,0	0,0	0,0	15,4	55,2
BI/6/1	[Gew.-% TM]	2,8	0,0	0,0	14,1	7,7	0,0	2,7	1,4	26,0	0,0	0,0	0,0	0,0	31,9	13,4
BI/6/2	[Gew.-% TM]	1,9	0,1	0,0	7,4	8,6	0,0	3,4	2,1	17,7	0,0	0,0	0,0	0,0	5,4	53,3
BI/1/1	[Gew.-% TM]	0,5	0,0	0,1	0,5	0,3	0,0	0,2	1,0	53,7	0,0	0,0	0,0	0,0	5,2	38,6
BI/1/2	[Gew.-% TM]	0,3	0,1	0,6	0,0	8,2	0,0	3,0	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	52,7	28,2
BI/1/3	[Gew.-% TM]	3,5	0,0	0,9	0,7	6,3	0,0	1,7	5,4	8,9	0,0	0,0	0,0	0,0	36,0	36,7
BI/1/4	[Gew.-% TM]	1,3	0,0	0,0	2,1	6,7	0,0	1,0	0,9	11,9	0,0	0,0	0,0	0,0	45,4	30,6
BI/1/5	[Gew.-% TM]	0,0	0,0	0,0	1,0	17,3	0,0	1,0	2,1	2,8	0,0	5,8	0,0	0,0	27,7	42,2
BI/1/6	[Gew.-% TM]	0,6	0,1	0,0	1,4	11,4	0,0	4,0	1,4	6,3	0,0	0,0	0,0	0,0	30,9	43,9
BI/1/7	[Gew.-% TM]	1,4	0,4	0,0	1,4	8,3	0,0	3,0	2,2	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	49,0	31,3
BI/1/8	[Gew.-% TM]	0,7	1,1	0,0	1,6	6,9	0,0	2,0	1,9	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	40,1	43,8
BI/1/9	[Gew.-% TM]	2,0	0,7	0,0	0,9	16,1	0,0	3,5	8,8	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	38,0	28,7
BI/1/10	[Gew.-% TM]	0,0	0,2	0,3	3,4	9,5	0,0	2,0	3,9	6,5	0,0	0,0	0,0	0,0	60,9	13,3
BI/2/1	[Gew.-% TM]	1,4	0,0	0,4	1,3	4,1	0,0	2,4	1,1	21,6	0,0	0,0	0,0	0,0	8,9	58,9
BI/3/1	[Gew.-% TM]	4,7	0,0	0,0	45,9	1,7	0,0	0,2	0,1	18,4	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	27,6
BI/3/2	[Gew.-% TM]	1,7	0,0	0,0	2,0	0,1	0,0	0,2	0,0	58,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	37,8
BI/3/3	[Gew.-% TM]	0,0	1,6	1,2	3,6	4,8	0,0	3,0	2,1	5,9	0,0	0,0	0,0	0,0	33,3	44,5

ANHANG 97: MITTLERE ZUSAMMENSETZUNG DER FRAKTION < 35 MM IN BEZUG ZUR GESAMTMASSE < 35 MM NACH BOHRSTAFFELN

Betrachtungsebene	Einheit	Fe-Metalle	NE-Metalle	PPK	Glas	Kunststoffe	Organik	Holz	Textilien	Mineralstoffe	Verpackungen	Kompl. Produkte	Schadstoffe	Stoffe ang.	Sortierreste	Fraktion < 5 mm
MW Bohrstaffel I	[Gew.-% TM]	1,26	0,14	0,00	6,85	10,63	0,00	1,77	2,73	11,91	0,00	0,00	0,00	0,00	24,28	40,44
MW Bohrstaffel II	[Gew.-% TM]	1,29	0,29	0,24	4,70	7,28	0,00	1,92	2,70	14,31	0,00	0,42	0,00	0,00	30,69	36,16
MW aus MW I und MW II	[Gew.-% TM]	1,28	0,22	0,12	5,77	8,95	0,00	1,85	2,71	13,11	0,00	0,21	0,00	0,00	27,48	38,30
MW Gesamtbetrachtung	[Gew.-% TM]	1,27	0,20	0,10	5,99	9,29	0,00	1,83	2,72	12,87	0,00	0,17	0,00	0,00	26,84	38,72

ANHANG 98: ZUSAMMENSETZUNG DER FRAKTION < 35 MM IN BEZUG ZUR GESAMTMASSE 5 - 35 MM

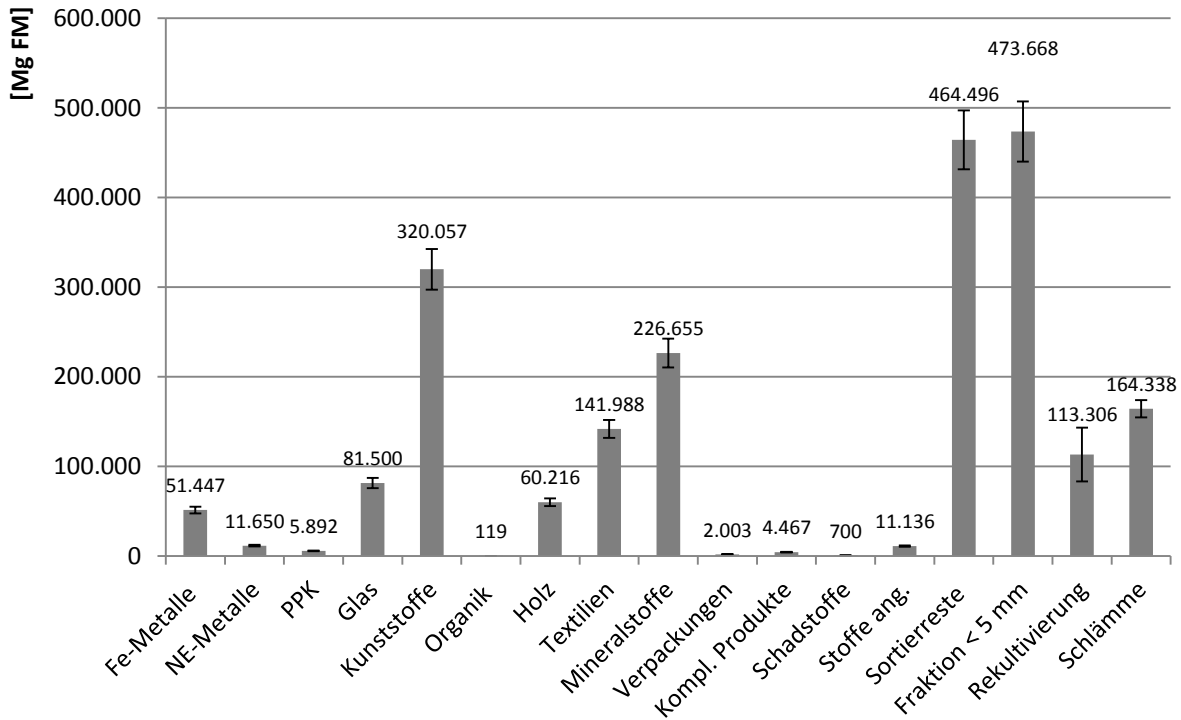
Probenbezeichnung	Einheit	Fe-Metalle	NE-Metalle	PPK	Glas	Kunststoffe	Organik	Holz	Textilien	Mineralstoffe	Verpackungen	Kompl. Produkte	Schadstoffe	Stoffe ang.	Sortierreste
BI/1/1	[Gew.-% TM]	2,5	0,6	0,0	9,7	39,2	0,0	0,0	0,0	17,5	0,0	0,0	0,0	0,0	30,6
BI/1/2	[Gew.-% TM]	0,8	0,3	0,0	6,1	20,4	0,0	1,8	1,5	15,6	0,0	0,0	0,0	0,0	53,7
BI/1/3	[Gew.-% TM]	4,6	0,7	0,0	8,7	29,9	0,0	1,2	5,1	40,8	0,0	0,0	0,0	0,0	9,0
BI/2/1	[Gew.-% TM]	0,5	0,0	0,0	2,0	16,0	0,0	2,9	7,8	15,7	0,0	0,0	0,0	0,0	55,2
BI/2/2	[Gew.-% TM]	4,2	0,0	0,0	12,0	26,8	0,0	3,8	7,8	16,5	0,0	0,0	0,0	0,0	29,0
BI/3/1	[Gew.-% TM]	4,5	0,1	0,0	25,5	21,5	0,0	3,4	7,8	21,4	0,0	0,0	0,0	0,0	15,9
BI/3/2	[Gew.-% TM]	1,1	1,4	0,0	7,2	13,1	0,0	2,8	3,6	10,3	0,0	0,0	0,0	0,0	60,7
BI/3/3	[Gew.-% TM]	6,3	0,1	0,0	2,4	16,3	0,0	4,7	13,9	13,9	0,0	0,0	0,0	0,0	42,4
BI/3/4	[Gew.-% TM]	2,4	0,0	0,0	10,7	15,9	0,0	4,2	12,8	7,1	0,0	0,0	0,0	0,0	47,0
BI/3/5	[Gew.-% TM]	2,6	0,1	0,0	18,3	25,4	0,0	2,0	7,1	18,1	0,0	0,0	0,0	0,0	26,6
BI/3/6	[Gew.-% TM]	1,5	0,0	0,0	8,0	14,6	0,0	5,7	1,5	15,5	0,0	0,0	0,0	0,0	53,3
BI/4/1	[Gew.-% TM]	0,9	0,1	0,0	37,0	26,7	0,0	0,0	0,0	34,1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2
BI/4/2	[Gew.-% TM]	0,0	0,0	0,0	3,9	9,7	0,0	6,3	3,0	23,3	0,0	0,0	0,0	0,0	53,9
BI/4/3	[Gew.-% TM]	0,0	0,2	0,0	18,9	15,6	0,0	1,2	3,9	18,8	0,0	0,0	0,0	0,0	41,5
BI/4/4	[Gew.-% TM]	1,8	0,1	0,0	16,8	16,9	0,0	4,2	3,7	13,5	0,0	0,0	0,0	0,0	43,0
BI/4/5	[Gew.-% TM]	3,2	0,0	0,0	7,6	10,6	0,0	3,5	2,9	10,6	0,0	0,0	0,0	0,0	61,6
BI/5/1	[Gew.-% TM]	0,0	0,0	0,0	2,3	15,1	0,0	0,9	4,7	20,6	0,0	0,0	0,0	0,0	56,3
BI/5/2	[Gew.-% TM]	0,0	0,0	0,0	15,7	9,4	0,0	2,8	2,2	29,7	0,0	0,0	0,0	0,0	40,2
BI/5/3	[Gew.-% TM]	1,9	0,6	0,0	16,7	14,9	0,0	5,4	5,6	20,7	0,0	0,0	0,0	0,0	34,3
BI/6/1	[Gew.-% TM]	3,3	0,0	0,0	16,3	8,9	0,0	3,1	1,6	30,0	0,0	0,0	0,0	0,0	36,9
BI/6/2	[Gew.-% TM]	4,1	0,2	0,0	15,8	18,5	0,0	7,2	4,6	38,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,6
<hr/>															
BII/1/1	[Gew.-% TM]	0,8	0,0	0,1	0,8	0,4	0,0	0,3	1,6	87,4	0,0	0,0	0,0	0,0	8,5
BII/1/2	[Gew.-% TM]	0,4	0,1	0,8	0,0	11,5	0,0	4,1	9,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	73,4
BII/1/3	[Gew.-% TM]	5,5	0,0	1,4	1,2	9,9	0,0	2,7	8,5	14,0	0,0	0,0	0,0	0,0	56,8
BII/1/4	[Gew.-% TM]	1,9	0,0	0,0	3,0	9,7	0,0	1,5	1,4	17,2	0,0	0,0	0,0	0,0	65,4
BII/1/5	[Gew.-% TM]	0,0	0,0	0,0	1,8	30,0	0,0	1,6	3,6	4,9	0,0	10,1	0,0	0,0	48,0
BII/1/6	[Gew.-% TM]	1,1	0,2	0,0	2,5	20,4	0,0	7,1	2,4	11,2	0,0	0,0	0,0	0,0	55,1
BII/1/7	[Gew.-% TM]	2,0	0,5	0,0	2,1	12,1	0,0	4,4	3,2	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0	71,3
BII/1/8	[Gew.-% TM]	1,2	1,9	0,0	2,8	12,4	0,0	3,5	3,3	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	71,4
BII/1/9	[Gew.-% TM]	2,8	1,0	0,0	1,2	22,6	0,0	4,9	12,3	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	53,3
BII/1/10	[Gew.-% TM]	0,0	0,2	0,4	3,9	11,0	0,0	2,3	4,4	7,5	0,0	0,0	0,0	0,0	70,2
BII/2/1	[Gew.-% TM]	3,5	0,0	1,0	3,0	10,1	0,0	5,8	2,7	52,4	0,0	0,0	0,0	0,0	21,6
BII/3/1	[Gew.-% TM]	6,5	0,1	0,0	63,4	2,4	0,0	0,2	0,1	25,4	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0
BII/3/2	[Gew.-% TM]	2,8	0,0	0,0	3,1	0,2	0,0	0,3	0,0	93,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
BII/3/3	[Gew.-% TM]	0,0	2,8	2,1	6,5	8,7	0,0	5,4	3,8	10,7	0,0	0,0	0,0	0,0	60,0

ANHANG 99: MITTLERE ZUSAMMENSETZUNG DER FRAKTION < 35 MM IN BEZUG ZUR GESAMTMASSE 5 - 35 MM NACH BOHRSTAFFELN

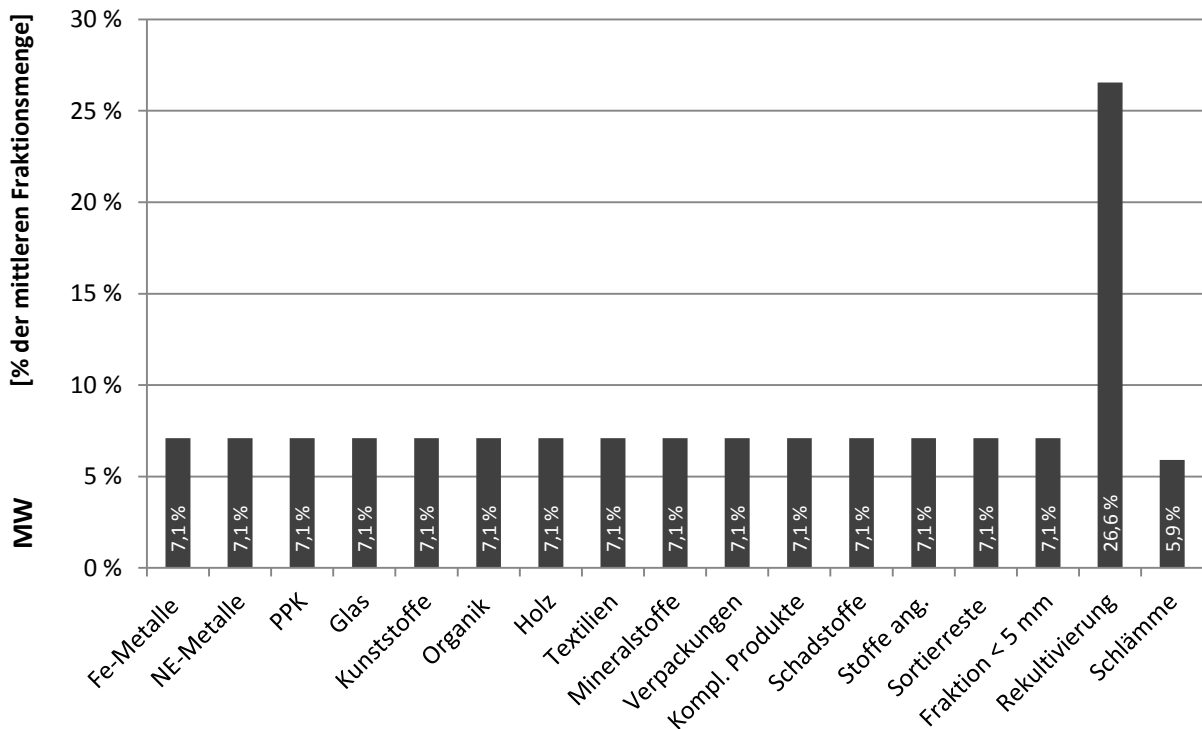
Betrachtungsebene	Einheit	Fe-Metalle	NE-Metalle	PPK	Glas	Kunststoffe	Organik	Holz	Textilien	Mineralstoffe	Verpackungen	Kompl. Produkte	Schadstoffe	Stoffe ang.	Sortierreste
MW Bohrstaffel I	[Gew.-% TM]	2,19	0,22	0,00	12,44	18,34	0,00	3,18	4,80	20,55	0,00	0,00	0,00	0,00	38,28
MW Bohrstaffel II		2,03	0,48	0,41	6,82	11,52	0,00	3,14	4,08	23,85	0,00	0,72	0,00	0,00	46,94
MW aus MW I und MW II		2,11	0,35	0,20	9,63	14,93	0,00	3,16	4,44	22,20	0,00	0,36	0,00	0,00	42,61
MW Gesamtbetrachtung		2,12	0,32	0,16	10,19	15,61	0,00	3,16	4,51	21,87	0,00	0,29	0,00	0,00	41,74

ANHANG 100: AUSWIRKUNG DER VARIATION DER ABLAGERUNGSMENGE AUF DAS STOFFPOTENZIAL DER KREISMÜLLDEPONIE HECHINGEN BEI GLEICHBLEIBENDER DEPONIEGUTZUSAMMENSETZUNG | GESAMTBETRACHTUNG REAL

Szenario Stofffraktion	MIN		MW		MAX		SD
	[Mg FM]	[Gew.-% FM]	[Mg FM]	[Gew.-% FM]	[Mg FM]	[Gew.-% FM]	[Mg FM]
Fe-Metalle	47.701	2,4%	51.447	2,4%	55.005	2,4%	28.263
NE-Metalle	10.802	0,6%	11.650	0,5%	12.455	0,5%	6.400
PPK	5.463	0,3%	5.892	0,3%	6.300	0,3%	3.237
Glas	75.566	3,9%	81.500	3,8%	87.135	3,8%	44.772
Kunststoffe	296.755	15,1%	320.057	15,0%	342.189	14,9%	175.824
Organik	110	0,0%	119	0,0%	127	0,0%	65
Holz	55.831	2,8%	60.216	2,8%	64.379	2,8%	33.080
Textilien	131.650	6,7%	141.988	6,7%	151.806	6,6%	78.001
Mineralstoffe	210.153	10,7%	226.655	10,6%	242.328	10,5%	124.514
Verpackungen	1.857	0,1%	2.003	0,1%	2.142	0,1%	1.100
Kompl. Produkte	4.142	0,2%	4.467	0,2%	4.776	0,2%	2.454
Schadstoffe	649	0,0%	700	0,0%	748	0,0%	384
Stoffe ang.	10.325	0,5%	11.136	0,5%	11.906	0,5%	6.117
Sortierreste	430.677	22,0%	464.496	21,8%	496.615	21,6%	255.172
Fraktion < 5 mm	439.182	22,4%	473.668	22,2%	506.422	22,0%	260.211
Rekultivierung	83.223	4,2%	113.306	5,3%	143.389	6,2%	65.605
Schlämme	155.732	7,9%	164.338	7,7%	175.088	7,6%	90.663
Summe	1.959.818	100,0%	2.133.638	100,0%	2.302.811	100,0%	



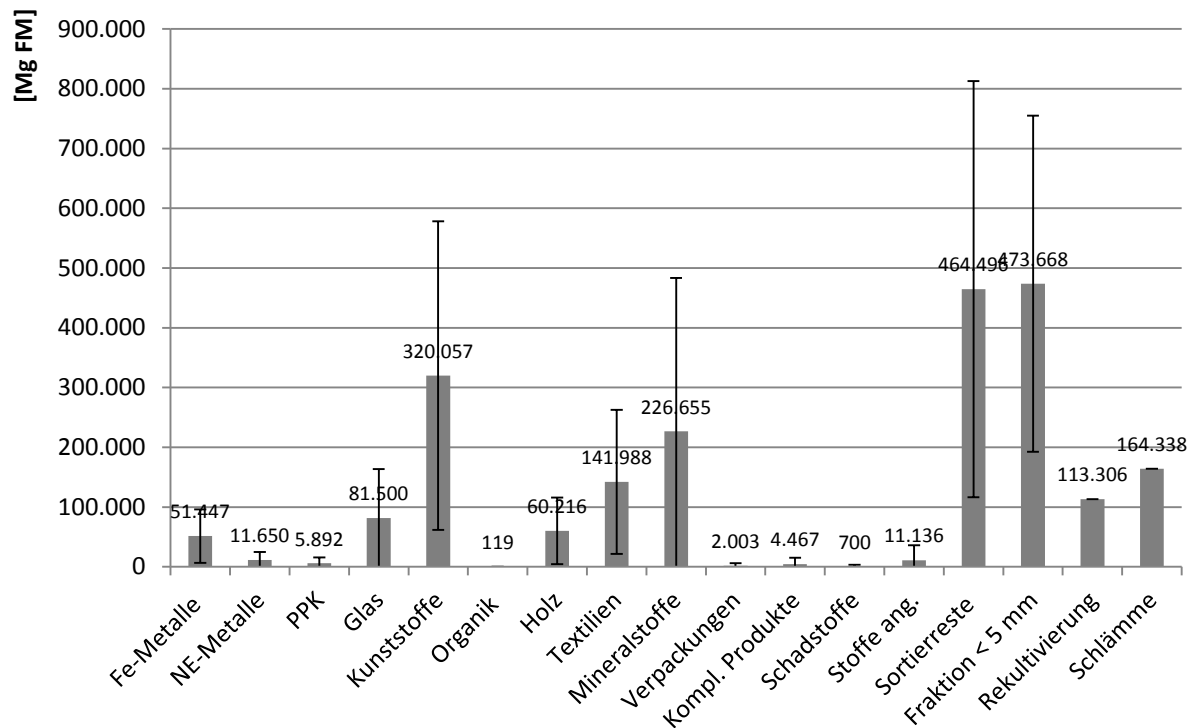
ANHANG 101: MODELLIERTES ABLAGERUNGSPOTENZIAL UND VARIATION NACH STOFFFRAKTIONEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER DEFINIERTEN GESAMTABLAGERUNGSMENGEN UND DER MITTLEREN DEPONIEGUTZUSAMMENSETZUNG NACH ABFALLARTEN | EINZELBETRACHTUNG REAL



ANHANG 102: VARIATIONSKOEFFIZIENT DER ABLAGERTEN STOFFFRAKTIONEN UNTER BETRACHTUNG DER MITTLEREN STOFFSPEZIFISCHEN GESAMTABLAGERUNGSMENGE | VARIATION ABLAGERUNGSMENGE REAL

ANHANG 103: AUSWIRKUNG DER VARIATION DER DEPONIEGUTZUSAMMENSETZUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER MITTLEREN GESAMTABLAGERUNGSMENGE | GESAMTBETRACHTUNG REAL

Szenario	Quantil (2,5%)		MW		Quantil (97,5%)		SD
	Mg FM	[Mg FM] [Gew.-% FM]	[Mg FM]	[Gew.-% FM]	[Mg FM]	[Gew.-% FM]	
Fe-Metalle	13.692	1,8%	51.447	2,4%	102.817	2,7%	44056,1
NE-Metalle	1.324	0,2%	11.650	0,5%	27.130	0,7%	11745,7
PPK	0	0,0%	5.892	0,3%	19.193	0,5%	8325,4
Glas	9.170	1,2%	81.500	3,8%	173.143	4,6%	75473,9
Kunststoffe	60.366	8,0%	320.057	15,0%	576.508	15,3%	252635,4
Organik	0	0,0%	119	0,0%	485	0,0%	210,1
Holz	8.212	1,1%	60.216	2,8%	120.055	3,2%	52443,7
Textilien	16.894	2,2%	141.988	6,7%	257.966	6,9%	114280,2
Mineralstoffe	66.714	8,8%	226.655	10,6%	569.545	15,1%	240458,2
Verpackungen	0	0,0%	2.003	0,1%	8.126	0,2%	3518,5
Kompl. Produkte	0	0,0%	4.467	0,2%	20.879	0,6%	9047,1
Schadstoffe	0	0,0%	700	0,0%	4.603	0,1%	2003,3
Stoffe ang.	0	0,0%	11.136	0,5%	47.412	1,3%	20532,3
Sortierreste	133.400	17,7%	464.496	21,8%	829.584	22,0%	358546,3
Fraktion < 5 mm	167.716	22,2%	473.668	22,2%	729.544	19,4%	319701,3
Rekultivierung	113.306	15,0%	113.306	5,3%	113.306	3,0%	62060,1
Schlämme	164.338	21,8%	164.338	7,7%	164.338	4,4%	90011,8
Summe	755.132	100,0%	2.133.638	100,0%	3.764.635	100,0%	



ANHANG 104: MODELLIERTES ABLAGERUNGSPOTENZIAL UND VARIATION NACH STOFFFRAKTIONEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER VARIATION DER DEPONIEGUTZUSAMMENSETZUNG BEI MITTLERER GESAMTABLAGERUNGSMENGE | EINZELBETRACHTUNG REAL

ANHANG 105: CO₂-EINSPARPOTENZIAL DURCH RECYCLING EINZELNER STOFFGRUPPEN

Faktoren der CO ₂ -Einsparung	Mg CO ₂ *Mg ⁻¹ Input			
	Fraktion	von	bis	MW
Stahl		0,817	0,903	0,86
Aluminium		9,376	10,363	9,87
Kupfer		3,344	3,696	3,52
PPK		0,085	0,094	0,09
Holz		0,731	0,808	0,77
Kunststoffe		1,805	1,905	1,86

Mengen der Stofffraktionen (vergl. Abb. 123)	Szenario MIN [Mg]	Szenario MW [Mg]	Szenario MAX [Mg]
Stahl	47.701	51.447	55.005
NE-Metalle gesamt	10.802	11.650	12.455
Aluminium (40 % der NE-Metalle)	4.321	4.660	4.982
Kupfer (35 % der NE-Metalle)	3.781	4.078	4.359
PPK	5.463	5.892	6.300
Holz	55.831	60.217	64.379
Kunststoffe	296.755	320.057	342.189

	Szenario MIN [Mg CO ₂]	Szenario MW [Mg CO ₂]	Szenario MAX [Mg CO ₂]
Stahl	38.972	44.244	49.670
Aluminium	40.512	45.994	51.628
Kupfer	12.643	14.353	16.112
PPK	464	530	592
Holz	40.812	46.367	52.018
Kunststoffe	535.643	593.706	651.870
Gesamt	669.046	745.195	821.890

ANHANG 106: MITTLERER GESAMTHEIZWERT DER HEIZWERTREICHEN FRAKTION

Stofffraktion	Mittlerer Heizwert [kJ*kg ⁻¹]	Anteil der Stofffraktionen an der heizwertreichen Fraktion [Gew.-%]	Anteiliger Heizwert [kJ*kg ⁻¹]
PPK	4.509	0,4	18
Kunststoffe/ Verpackungen	25.625	43,3	11.096
Holz	6.264	4,0	251
Textilien	8.026	10,2	819
Stoffe ang./ kompl. Produkte	7.776	1,3	101
Sortierreste	12.134	40,8	4.951
Gesamtheizwert der heizwertreichen Fraktion			17.235

ANHANG 107: HEIZWERTBERECHNUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG SPEZIFISCHER HEIZWERTE UND MITTLERER DEPONIEGUTZUSAMMENSETZUNG

Fraktionsmenge [Mg]	Fraktion	Spezifischer Heizwert [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$]			Heizwert [GJ]		
		MW	MIN	MAX	MW	MIN	MAX
2.170	PPK	4.569	3.867	4.991	9.915	8.391	10.830
252.558	Kunststoffe/ Verpackungen	25.959	23.023	27.739	6.556.034	5.814.640	7.005.588
23.229	Holz	6.264	5.408	6.860	145.513	125.622	159.352
59.409	Textilien	8.204	7.543	8.953	487.409	448.114	531.889
6.904	Stoffe ang./ kompl. Produkte	7.862	7.491	8.523	54.280	51.719	58.843
237.221	Sortierreste	12.167	11.542	12.758	2.886.219	2.737.906	3.026.466
	Summe				10.139.370	9.186.393	10.792.968

ANHANG 108: ANLAGENKONFIGURATION ZUR BERECHNUNG DES SPEZ. ENERGIEVERBRAUCHS DER AUFBEREITUNG BASIEREND AUF DER BESTEHENDEN ANLAGE DES RECYCLINGUNTERNEHMES KORN [KORN, 2011]

Aggregat	Anzahl	elektrischer Anschlusswert in kW	Gesamt Stromverbrauch GJ*h ⁻¹
Aufgabe- und Dosierbunker	1	15	0,04
Siebtrommel	1	25	0,06
Elektromagnet	4	30	0,30
Induktionssortiersystem	4	15	0,15
Windsichtung	3	60	0,45
Nahinfrarotsortiersystem	3	20	0,15
Röntgensortiersystem	3	20	0,15
Vorzerkleinerer	1	350	0,88
Granulator	3	320	2,42
Stahlbau- und Fördertechnik	1	200	0,50
Kompressoren	3	230	1,74
Planung	1		0,00
Elektroplanung	1		0,00
Elektroarbeiten	1		0,00
Brandschutz	1		0,00
Genehmigung	1		0,00
Halle, Lagerboxen	1		0,00
Radlader	2		0,00
Sortier- und Verladebagger	1		0,00
sonstige Infrastrukturelle Maßnahmen	1	100	0,25
Gesamt			7,11
Aufzubereitende Deponiegutmasse (Szenario MW)	Mg		2.133.638,00
Anlagendurchsatz	Mg*h⁻¹		50,00
Benötigte Arbeitsstunden	h		42672,76
Spezifischer Energieverbrauch	GJ*Mg⁻¹		0,14

ANHANG 109: KOSTENKALKULATION DER NACHSORGE NACH BURKHARDT & EGLOFFSTEIN [2005]

Nachsorgekosten | Kalkulation 1

Ausgangsdaten Kreismülldeponie Hechingen

Ablagerungsfläche	m ²	ha
MIN*	108.000	10,80
MW	120.000	12,00
MAX*	132.000	13,20

* Abweichung vom MW jeweils +/- 10 %

Ablagerungsvolumen	m ³
MIN*	2.070.000
MW	2.300.000
MAX*	2.530.000

* Abweichung vom MW jeweils +/- 10 %

Ablagerungsmasse	Mg
Szenario MIN	1.959.818
Szenario MW	2.133.638
Szenario MAX	2.302.811

Annahmen der Kalkulation 1

Statistische Kenngröße	Volumina	Flächen	Verhältnis	Spezifische Nachsorgekosten	Spezifische Nachsorgekosten
	[m ³]	[m ²]	[m ³ *m ⁻²]	[€*m ⁻²]	[€*m ⁻³]
MIN*	1,00	7,50	0,13	200,00	10,50
MW	2,90	19,10	0,15	250,00	17,50
MAX*	4,80	28,50	0,17	310,00	23,00

Angenommener Wertebereich	Flächenbezug	
	von [€*m ⁻²]	bis [€*m ⁻²]
MIN*	180,00	225,00
MW	200,00	250,00
MAX*	220,00	275,00

Volumenbezug	
von [€*m ⁻³]	bis [€*m ⁻³]
9,45	15,75
10,50	17,50
11,55	19,25

Nachsorgekosten der Kreismülldeponie Hechingen [€]

Statistische Kenngröße	Flächenbezug	
	von	bis
MIN	19.440.000	29.700.000
MW	21.600.000	33.000.000
MAX	23.760.000	36.300.000

Volumenbezug	
von	bis
19.561.500	39.847.500
21.735.000	44.275.000
23.908.500	48.702.500

Gesamtbetrachtung [€]	
MIN	19.440.000
MW**	30.152.500
MAX	48.702.500

** stellt den MW aller Berechnungen dar!

ANHANG 110: KOSTENKALKULATION DER NACHSORGE NACH BÖLTE & GEIPING [2011]

Nachsorgekosten | Kalkulation 2

Ausgangsdaten Kreismülldeponie Hechingen

Ablagerungsfläche	m ²	ha
MIN*	108.000	10,80
MW	120.000	12,00
MAX*	132.000	13,20

* Abweichung vom MW jeweils +/- 10 %

Ablagerungsvolumen	m ³
MIN*	2.070.000
MW	2.300.000
MAX*	2.530.000

* Abweichung vom MW jeweils +/- 10 %

Ablagerungsmasse	Mg
Szenario MIN	1.959.818
Szenario MW	2.133.638
Szenario MAX	2.302.811

Nachsorgekosten [€]	von	bis	MW
€*Mg ⁻¹	23,00	30,00	26,50
Szenario MIN	45.075.824	58.794.552	51.935.188
Szenario MW	49.073.671	64.009.136	56.541.403
Szenario MAX	52.964.645	69.084.320	61.024.483

Gesamtbetrachtung [€]	
MIN	45.075.824
MW**	56.500.358
MAX	69.084.320

** stellt den MW aller Berechnungen dar!

ANHANG 111: KOSTENKALKULATION DER NACHSORGE NACH EITNER [2010C]

Nachsorgekosten | Kalkulation 3

Ausgangsdaten Kreismülldeponie Hechingen

Ablagerungsfläche	m ²	ha
MIN*	108.000	10,80
MW	120.000	12,00
MAX*	132.000	13,20

* Abweichung vom MW jeweils +/- 10 %

Ablagerungsvolumen	m ³
MIN*	2.070.000
MW	2.300.000
MAX*	2.530.000

* Abweichung vom MW jeweils +/- 10 %

Ablagerungsmasse	Mg
Szenario MIN	1.959.818
Szenario MW	2.133.638
Szenario MAX	2.302.811

Siedlungsabfalldeponie	Spezifische Nachsorgekosten [€*m ⁻³]
MIN	8,90
MW	10,00
MAX	11,60

Ablagerung	Nachsorgekosten [€]		
	MIN	MW	MAX
Szenario MIN	18.423.000	19.665.000	24.012.000
Szenario MW	20.470.000	21.850.000	26.680.000
Szenario MAX	22.517.000	24.035.000	29.348.000

Gesamtbetrachtung [€]	
MIN	18.423.000
MW**	23.000.000
MAX	29.348.000

** stellt den MW aller Berechnungen dar!

ANHANG 112: KOSTENKALKULATION DER NACHSORGE NACH STEGMANN ET AL. [2006]

Nachsorgekosten | Kalkulation 4

Kostenhauptgruppe/ -untergruppe	Spezifische Kosten	Kreismülldeponie Hechingen							
		Einheit	von	bis	notwendige Maßnahme von	bis	Kosten der Maßnahme [€] von	bis	Mittelwert
Oberflächenabdichtung/ - abdichtung									
						805.000	3.220.000	2.012.500	
• Profilierung	€*m ⁻²	2	10	10.000	20.000	20.000	200.000	110.000	
• temporäre Oberflächenabdichtung inkl. Infrastruktur	€*m ⁻²	15	45	10.000	20.000	150.000	900.000	525.000	
• endgültige Oberflächenabdichtung inkl. Infrastruktur	€*m ⁻²	60	100	10.000	20.000	600.000	2.000.000	1.300.000	
• Rückbaumaßnahmen im Rahmen der Stilllegung	€*m ⁻²	1	3	35.000	40.000	35.000	120.000	77.500	
Sickerwasserbehandlung (Betrieb und Kapaldienst)									
• Sickerwasserbehandlung vor Ort	€*m ⁻³	20	50	55.000	60.000	1.100.000	3.000.000	2.050.000	
• externe Sickerwasserbehandlung inkl. Transport	€*m ⁻³	20	60	0	0	0	0	0	
• vereinfachte Reinigung, z.B. Pflanzenkläranlagen	€*m ⁻³	2	10	0	0	0	0	0	
Deponiegasbehandlung (Betrieb und Kapaldienst)						168.000	323.200	245.600	
• aktive Gasfassung und thermische Gasbehandlung	€*ha ⁻¹	8.000	12.000	14	16	112.000	192.000	152.000	
• aktive Gasfassung und Biofiltereinsatz	€*ha ⁻¹	4.000	8.000	14	16	56.000	128.000	92.000	
• passive Methanoxidation über Rekultivierungsschicht	€*ha ⁻¹	0	200	14	16	0	3.200	1.600	
In situ Stabilisierung									
• Infiltrationssystem	€*a ⁻¹ *ha ⁻¹	4.000	6.000	0	0	0	0	0	
• aktive in situ Belüftung (ohne Abluftbehandlung)	€*a ⁻¹ *ha ⁻¹	2.000	4.000	0	0	0	0	0	
Sonstige laufende Kosten						399.000	832.000	615.500	
• Unterhaltung Oberflächenabdichtung	€*a ⁻¹ *ha ⁻¹	4.000	10.000	14	16	56.000	160.000	108.000	
• Unterhaltung aktive Gasfassung	€*a ⁻¹ *ha ⁻¹	5.000	7.000	14	16	70.000	112.000	91.000	
• Unterhaltung Sickerwasserfassung	€*a ⁻¹ *ha ⁻¹	4.000	6.000	14	16	56.000	96.000	76.000	
• Unterhaltung Infrastruktur	€*a ⁻¹ *ha ⁻¹	4.000	6.000	14	16	56.000	96.000	76.000	
• Gasmonitoring	€*a ⁻¹ *ha ⁻¹	1.000	3.000	14	16	14.000	48.000	31.000	
• Setzungsmessungen	€*a ⁻¹ *ha ⁻¹	500	1.000	14	16	7.000	16.000	11.500	
• Sickerwassermonitoring	€*a ⁻¹ *ha ⁻¹	2.000	4.000	14	16	28.000	64.000	46.000	
• Grundwassermonitoring	€*a ⁻¹ *ha ⁻¹	1.000	3.000	14	16	14.000	48.000	31.000	
• Umfeldüberwachung inkl. Wetterdaten etc.	€*a ⁻¹ *ha ⁻¹	1.000	2.000	14	16	14.000	32.000	23.000	
• Versicherungen etc.	€*a ⁻¹ *ha ⁻¹	2.000	4.000	14	16	28.000	64.000	46.000	
• Nachsorge management, Berichtswesen und Dokumentation	€*a ⁻¹ *ha ⁻¹	4.000	6.000	14	16	56.000	96.000	76.000	

Nachsorgekosten [€]	MIN	MAX	MW
Investitionskosten:	805.000	3.220.000	2.012.500
Zeitabhängige Kosten (aktuell):	567.000	1.600.118	861.100
Summe:	1.372.000	4.820.118	2.873.600
Summe laufende Kosten* (50 Jahre Nachsorge)	10.552.518	21.499.593	16.026.055
Gesamtnachsorgekosten nach 50 Jahre	11.357.518	24.719.593	18.038.555

*Unter Annahme eines linearen Rückgangs der zeitabhängigen Nachsorgekosten

ANHANG 113: ZUSAMMENFASSENDE DARSTELLUNG DER NACHSORGEKOSTENKALKULATION (BASISDATEN SIND ANHANG 96 - 99 ZU ENTNEHMEN)

Kostenkalkulation der Nachsorge						
Varianten	1	2	3	4	MW	Standard- abweichung
MIN	19.440.000	45.075.824	18.423.000	11.357.518	23.574.085	14.778.290
MW	30.152.500	56.500.358	23.000.000	18.038.555	31.922.853	17.122.879
MAX	48.702.500	69.084.320	29.348.000	24.719.593	42.963.603	20.276.878