

Deponierückbau als Beitrag zur Ressourcensicherung

– verwertbare Stoffströme aus der Feinaufbereitung –

Sebastian Wanka, Kai Münnich und Klaus Fricke

1.	Material	210
2.	Wertstoffpotenziale	212
3.	Aufbereitungstechnik	213
4.	Versuchsauswertung	215
5.	Produktqualitäten	217
6.	Ausblick	224
7.	Literatur	227

Die Motivation, Rückbaumaßnahmen an einen Deponiekörper durchzuführen, kann verschiedene Ursachen haben. Bisher durchgeführte Rückbaumaßnahmen resultierten dabei vorrangig aus umweltrelevanten Aspekten, der Nutzungsdauerverlängerung bestehender Deponieflächen oder vor dem Hintergrund einer alternativen Flächennutzung. Eine weitere aktuelle Entwicklung zeichnet sich in der Betrachtung der Deponiekörper als Lagerstätte für Sekundärrohstoffe ab. Dabei ist die technische Umsetzung von Deponierückbaumaßnahmen zur Rohstoffgewinnung und die Erzeugung vermarktungsfähiger Produkte vor allem abhängig von der Quantität und Qualität der in dem Deponiekörper eingebauten Stoffe.

Mit dem BMBF-Forschungsvorhabens *r³- Strategische Metalle-Verbundvorhaben: TÖNSLM – Entwicklung innovativer Verfahren zur Rückgewinnung ausgewählter Ressourcen aus Siedlungsabfall- und Schlackedeponien* erfolgte eine ganzheitliche Betrachtung von Deponierückbaumaßnahmen unter dem Aspekt, inwieweit vorhandene Technik zur Aufbereitung des Deponates geeignet ist, bzw. wie eine weitestgehende Nutzung der darin enthaltenen Ressourcen erfolgen kann. Mit dem Forschungsvorhaben wurden Ressourcenpotenziale betrachtet sowie ökonomisch-ökologische tragbare Szenarien zur Gewinnung und Nutzung dieser entwickelt.

Die Feinfraktion, je nach Siebschnitt < 20 bis < 60 mm, nimmt mit bis zu 70 Prozent den größten Masseanteil bei klassischen Siedlungsabfalldeponien ein. Nach dem aktuellen Stand des Wissens liegen jedoch kaum Informationen vor, welche Techniken zur Aufbereitung dieser Feinfraktion geeignet sind bzw. welche Materialströme und Produktqualitäten erzeugt werden können.

Aus diesem Grund soll hier gezielt die Aufbereitung des Feingutes < 60 mm betrachtet werden, die Aufbereitung und Konfektionierung der Grobfraktion > 60 mm wird im Rahmen des Forschungsprojektes getrennt betrachtet.

Das Feinmaterial stellt aufgrund seiner inhomogenen Zusammensetzung ein trennschwieriges Gemisch dar, dass für die Aufbereitung mit konventionellen trockenmechanischen Sortierverfahren weniger geeignet ist. Darüber hinaus kann mit trockenen Verfahren kaum Einfluss auf Verunreinigungen an den Partikeloberflächen und damit auf die Produktqualität genommen werden. Aus diesem Grund wurde gezielt der Ansatz der Aufbereitung des Deponats mittels Setzbettechnik verfolgt, welche ihren Ursprung in der Erz-, Sand- und Kiesgewinnung hat. Anwendung finden diese nassmechanische Verfahren auch in der Bodenwäsche zu Abreicherung von Schadstoffen und zunehmend im Rahmen des Recyclings, so zum Beispiel in der Stahlschrott-, Schlacke- oder Baustoffaufbereitung. Durch die *Waschfunktion* wird erwartet, dass Oberflächenanhaftungen zumindest bei der gröberen Kornklasse entfernt und dadurch die für die Qualitätseinstufung relevanten eluierbaren Stoffe abgetrennt werden. Zu der Erkenntnis, dass die Produktqualitäten von Stoffströmen, die ihren Ursprung im Deponierückbau haben, maßgeblich durch die feinen Anhaftungen bestimmt werden kamen auch Friedmann und Zollner [3].

Mit der Aufbereitung des Feinmaterials < 60 mm können relevante Mengen an Ressourcen in Form von mineralischen oder heizwertreichen Stoffströmen im ökonomisch und ökologisch vertretbaren Rahmen zur Verfügung gestellt werden. Zusätzlich kann bei einer Nutzung dieser Stoffströme bis zu 80 Prozent Deponievolumen generiert werden.

Im Rahmen dieses Artikels sollen die durch die nassmechanische Aufbereitung erzeugten Stoffströme hinsichtlich ihrer Qualität untersucht werden. Ziel ist hierbei eine möglichst hochwertige Verwertung der einzelnen Fraktionen. Als Referenz für die erzielten Qualitäten der erzeugten inerten Stoffströme Schwergut und Feingut sowie der Leichtfraktion dienen damit folgende Anforderungen:

- umweltrelevante Anforderungen für Baustoffe gemäß der LAGA M20 (2003) bzw. TL-Gestein;
- bautechnische Anforderungen gemäß TL-Gestein StB, TL SoB-StB bzw. TL BuB E-StB 09;
- brennstofftechnische Anforderungen im Vergleich zum RAL-Gütezeichen 724 für Sekundärbrennstoffe.

1. Material

Das Probenmaterial für die Versuchsdurchführungen zur nassmechanischen Aufbereitung im halbertechnischen Maßstab stammt aus der Deponie des Entsorgungszentrums Pohlische Heide im Kreis Minden-Lübbecke. Bei der Deponie handelt es sich um eine Haus- und Gewerbeabfalldeponie, die im Zeitraum von 1989 bis 2005 verfüllt wurde.

Für die Nassmechanische Aufbereitung wurde Deponat in den Korngrößen < 60 mm, < 25 mm und $10\text{--}60$ mm untersucht, das direkt auf der Deponie nach einer Zerkleinerung mittels Trommelsieb abgeseibt wurde. Die Konfektionierung und Weiterverarbeitung des Grobgutes > 60 mm wird im Rahmen des Forschungsprojektes getrennt betrachtet. Bild 1 zeigt die Sieblinien des Deponates im Originalzustand aus den zwei verschiedenen Schürfen K1 und K2. Der erste Siebschnitt erfolgte dabei bei 140 mm. Der Anteil der Feinfraktion < 60 mm beträgt dabei etwa $60\text{--}70$ Prozent. Diese Ergebnisse decken sich mit Werten aus weiteren Untersuchungen zum Rückbau von Siedlungsabfalldeponien [2, 10].

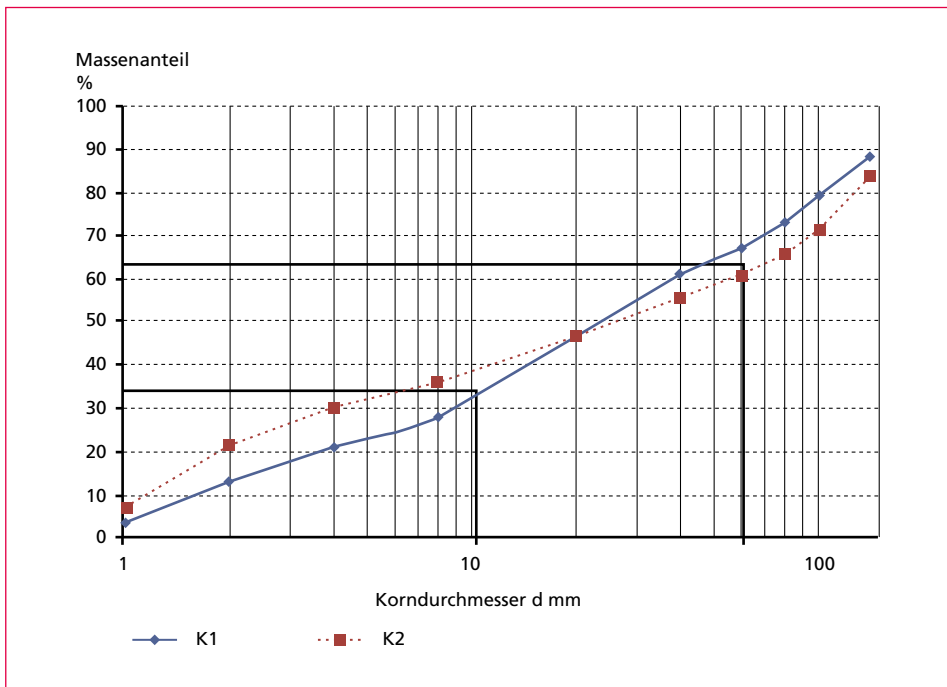


Bild 1: Sieblinien des Deponats < 140 mm

Die Sieblinien verdeutlichen den hohen Anteil der Feinfraktion am Gesamtdeponat. Informationen zur Aufbereitung dieser Feinfraktion sind kaum vorhanden, da bei früheren Rückbauprojekten diese Feinfraktion in der Regel ohne weitere Behandlung wieder abgelagert wurde [10]. Werden Deponierückbaumaßnahmen vor dem Hintergrund betrachtet, möglichst hohe Ausbeuten von Wertstoffen zu erreichen bzw. den Anteil des wieder zu deponierenden Materials auf ein Minimum zu senken, sind Verfahrensentwicklungen notwendig, die in der Lage sind, einen möglichst großen Anteil dieser Fraktion in verwertbare Sekundärrohstoffe zu überführen.

2. Wertstoffpotenziale

Eine erste Charakterisierung der Feinfraktion < 60 mm erfolgte unter anderem anhand der Parameter Wassergehalt, Glühverlust und TOC (Tabelle 1.) Ergänzend dazu wurde die stoffliche Zusammensetzung der Feinfraktion über die klassische Methode der Abfallanalyse differenziert nach Kornfraktionen bestimmt (Bild 2).

Datum	K1			K2		
	TS	GV	TOC	TS	GV	TOC
	%			%		
26.09.2013	67,6	33,3	11,8	78,9	23,2	9,2
17.10.2013	66,8	40,1	15,5	75,4	19,4	9,0
31.10.2013	68,3	27,4	15,2	70,8	22,1	8,1
12.11.2013	66,6	17,4	9,5	80,3	8,5	5,0
19.11.2013	68,3	32,7	17,8	73,7	19,0	10,4
12.12.2013	73,7	25,9	14,1	69,1	22,2	12,1

Tabelle 1:

Trockensubstanz, Glühverluste und TOC-Gehalte der Feinfraktion < 60 mm

Die Glühverluste deuten im Zusammenhang mit den TOC-Gehalten auf einen hohen Anteil mineralischer Bestandteile hin.

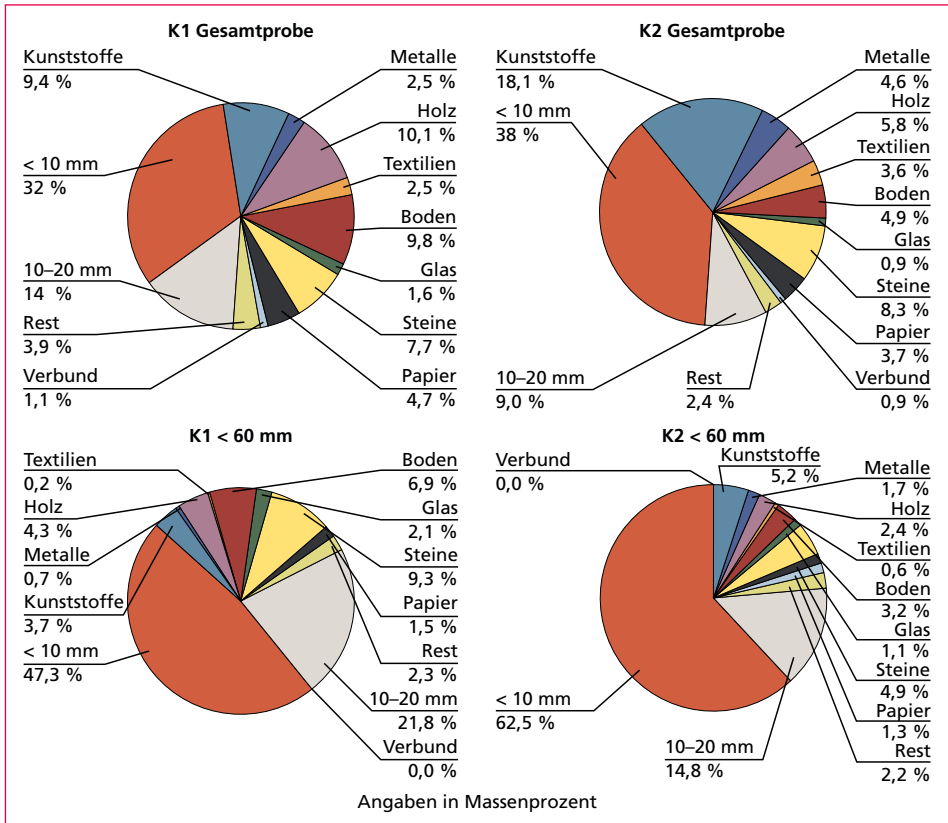


Bild 2: Stoffliche Zusammensetzung des Gesamtdeponats und der Fraktion < 60 mm

Der Gehalt an heizwertreichen Bestandteilen im Deponat liegt gemäß Sortieranalysen bei etwa 30 Prozent. Bei einem Massenanteil der Fraktion < 60 mm von 60–70 Prozent vom gesamten rückgebauten Deponat ergibt sich aus der Bild 2 ein Anteil heizwertreicher Fraktionen in der Feinfraktion von etwa 6 Prozent. Damit befinden sich etwa 20 Prozent der gesamten heizwertreichen Bestandteile im Deponat in der Fraktion < 60 mm (Bild 3). Diese Ergebnisse liegen damit in der gleichen Größenordnung wie sie im Rahmen anderer Deponierückbaumaßnahmen ermittelt wurden [4].

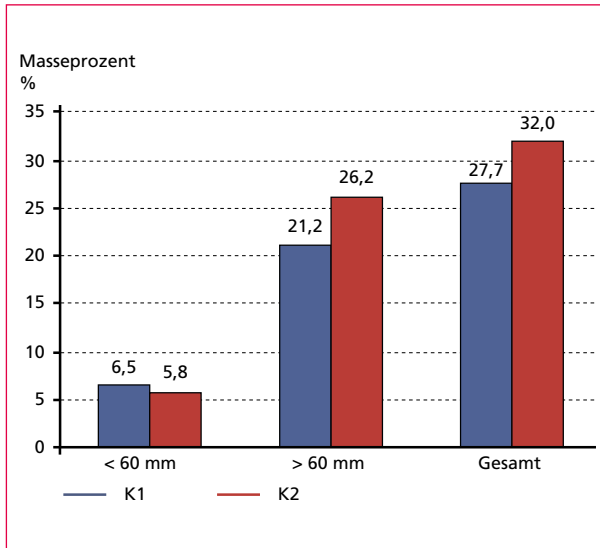


Bild 3:

Verteilung der heizwertreichen Fraktion im Deponat

3. Aufbereitungstechnik

Die Verfahren der nassmechanischen Aufbereitung finden vor allem bei der Erz-, Sand- und Kiesgewinnung Anwendung. Zunehmend wird diese Technik aber auch im Rahmen des Recyclings eingesetzt, wie zum Beispiel in der Stahlschrott-, Schlacke- oder Baustoffaufbereitung [9]. Bei der Baustoffaufbereitung können durch einen Separationsvorgang aus dem Ausgangsstoff schwimmfähige Verunreinigungen wie z.B. Papier, Humusstoffe oder Leichtkunststoffe abgetrennt werden. Ein weiteres Einsatzgebiet stellt die Bodenwäsche zur Abreicherung von Schadstoffen dar [5]. Im Rahmen des Forschungsvorhabens soll untersucht werden, inwieweit die Setztechnik zur Aufbereitung von Deponat eingesetzt werden kann. Für die Setztechnik sprechen die hohe Trennschärfe bei sortierschwierigen Stoffgemengen sowie deren Einfachheit und Robustheit.

Die Stoffstromtrennung mittels Nasssetzmaschine basiert auf der Sortierung von Feststoffkomponenten innerhalb eines Materialgemisches gemäß ihrer Dichteunterschiede. Die Versuchsanordnung ist in den Bildern 4 und 5 dargestellt. Zunächst gelangt das Material über einen Aufgabetrichter auf den Setzbettträger, der aus einem Siebelag

mit Spaltöffnungen von 2 mm besteht. Der Materialtransport erfolgt aufgrund der Neigung des Setzbettträgers, der eingetragenen Hubenergie und der nachdrückenden Materialvorlage. Das Schüttgut wird vom Prozesswasser vertikal pulsierend von unten durchströmt und dabei aufgelockert. Als Folge der unterschiedlichen materialspezifischen Dichten und den daraus folgenden unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeiten ergibt sich eine Schichtung im Schüttgut. Die spezifisch leichten Bestandteile gelangen an die Oberfläche der Schüttung, die spezifisch schweren Bestandteile reichern sich im unteren Bereich an. Die Stoffstromtrennung erfolgt aus einer Vorratsschicht am Ende der Setzmaschine. Eine Regeleinrichtung gewährleistet dabei eine konstante Höhe der Schwergutschichtung am Überlauf. Über eine Grenzschieferfassung innerhalb des Setzbettes wird das Schwergut durch eine drehzahlgeregelte Zellenradschleuse kontinuierlich abgezogen. Das Leichtgut wird zusammen mit dem Prozesswasserüberlauf ausgetragen.

Zusätzlich in den Prozesswasserkreislauf integriert ist ein Hydrozyklon. Dieser ermöglicht das Abscheiden feiner, vorwiegend mineralischer Bestandteile, die über die Sieblochung im Setzbettfass – Maschenweite 2 mm – oder während der Entwässerung der Stoffströme auf den Entwässerungssieben – Maschenweite 2 mm – in das Prozesswasser gelangen. Das über den Zyklon aufbereitete Prozesswasser wird anschließend wieder dem Prozesswasserkreislauf zugeführt.

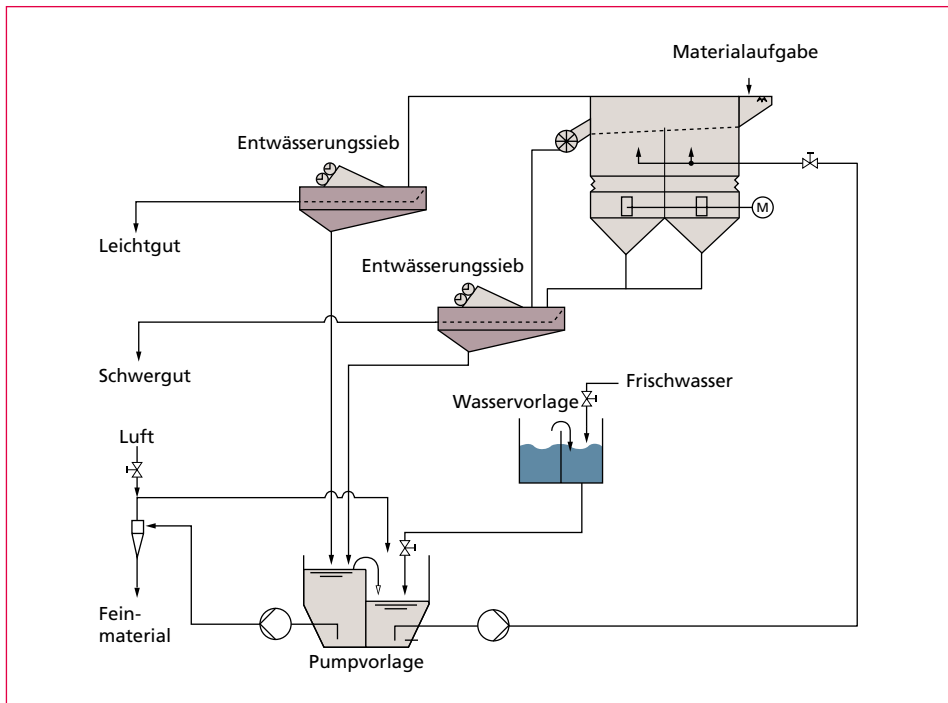


Bild 4: Vereinfachtes Verfahrensfliessbild zur Nassmechanischen Aufbereitung von Deponat im halbtechnischen Maßstab mittels Nasssetzmaschine Triple A (AGS Anlagen + Verfahren GmbH)

Bezogen auf die Charakteristik des Ausgangsmaterials ist eine variable Einstellung der Prozessparameter Aufstromwassermenge, Setzbetthöhe, Hubfrequenz, Hubamplitude und Form des Setzhubdiagramms möglich. Weiterhin begünstigt der Unterwasserzusatz die Auflockerung des Materials. Für die Festlegung dieser Maschinenparameter gibt es Empfehlungen aus der Literatur. Der Hub beispielsweise ist anhängig von der Setzbetthöhe, welche wiederum mindestens dem Dreifachen der oberen Korngröße entsprechen sollte. Die Hubzahl ist anschließend in Abhängigkeit vom Hub und dem Unterwasserstrom festzulegen, wobei der Unterwasserstrom eine Strömungsgeschwindigkeit von 0,6 cm/s nicht überschreiten sollte [9]. Aus der Praxis der Erz- und Kohleaufbereitung sind entsprechende Richtwerte für diese Parameter bekannt. Im Vergleich zu diesen Stoffen ist die Materialbeschaffenheit des hier betrachteten Deponates sehr inhomogen. Auf entsprechende Erfahrungswerte kann nicht direkt zurückgegriffen werden. Für nachfolgende Versuche wurden deshalb vom Anlagenhersteller empfohlene Werte für die Setzbetthöhe, Hubamplitude und Hubfrequenz verwendet. Die Parameter wurden über den gesamten Versuchszeitraum konstant gehalten, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Verschiedene Arten von Hubbewegungen finden in der Praxis Anwendung. Im Rahmen dieser Versuchsdurchführung wurde eine asymmetrische Schwingungsform vom Anlagenbetreiber empfohlen. Untersuchungen zur Optimierung der Setzbetttechnik haben zusätzlich bestätigt, dass der asymmetrische Hub die Trennwirkung begünstigt [6].

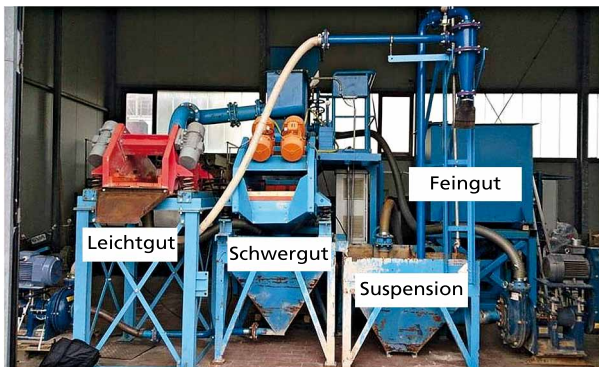


Bild 5:

Versuchsanlage im halbtechnischen Maßstab

4. Versuchsauswertung

Insgesamt wurden 17 Einzelversuche im halbtechnischen Maßstab durchgeführt, wobei jeweils pro Versuch zwischen 700 und 900 kg Deponat behandelt wurden. Zum Einsatz kam dabei die Fraktionen < 25 mm, < 60 mm sowie Deponat der Partikelgröße 10–60 mm. Insgesamt konnte bei allen Versuchen nach erster visueller Einschätzung eine gute Stoffstromtrennung hinsichtlich der Schwer- und Leichtstoffe erreicht werden.

Im Hinblick auf die Erzeugung verwertbarer Produkte wird nachfolgend nur auf die Fraktion 10–60 mm eingegangen, da die Untersuchungen gezeigt haben, dass die Aufbereitung in dieser ausgeführten Versuchsanordnung nur akzeptable Ergebnisse liefert, wenn die Feinfraktion < 10 mm vorher abgetrennt wird.

Der Massenanteil der Fraktion < 10 mm ist mit etwa 30 Prozent bezogen auf die Gesamtmasse des Deponates sehr hoch (Bild 1). Diese Fraktion mit einem Glühverlust von etwa 20 Prozent gelangt bei der Dichtentrennung in das Leichtgut und wirkt sich bei der gewünschten Erzeugung einer Fraktion zur energetischen Verwertung nachteilig aus, außerdem kann bei der Abscheidung dieser Fraktion vor der nassmechanischen Aufbereitung die Trenneffizienz des Aufbereitungsaggregates verbessert sowie die Einsatzdauer des Waschmediums verlängert werden. Eine Sortierung der Fraktion < 10 mm ist grundsätzlich mit vergleichbar guten Ergebnissen möglich, bedarf dazu jedoch einer abgeänderten Versuchsanordnung. Dies war nicht Gegenstand der hier beschriebenen Untersuchungen. Die Aufteilung der erzeugten Massenströme, normiert auf die Fraktion 10–60 mm, ist in Bild 6 dargestellt.

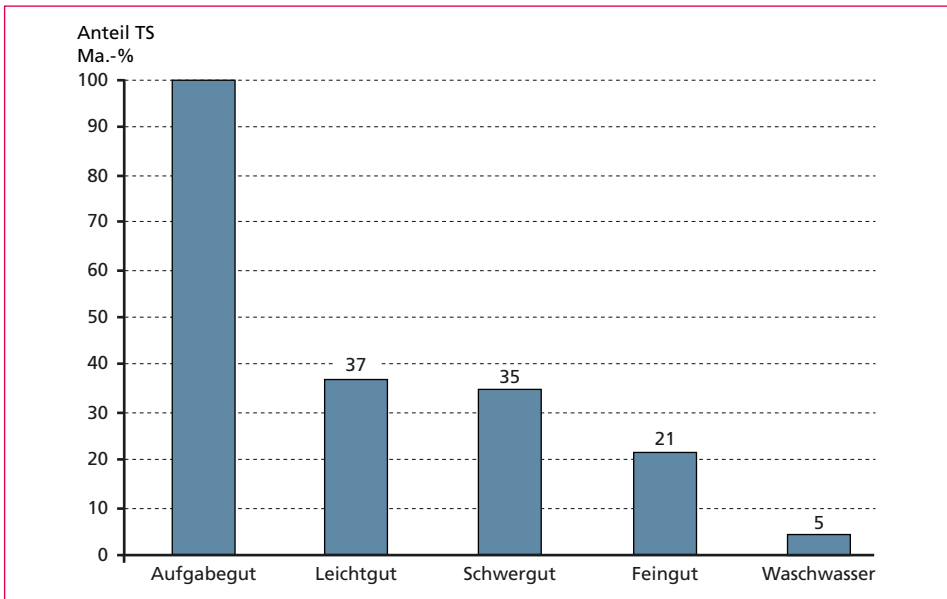


Bild 6: Stoffstromaufteilung der Feinfraktion 10–60 mm infolge nassmechanischer Aufbereitung

Während der Versuchsdurchführung wurden die in der Tabelle 2 aufgelisteten technischen Kenngrößen bestimmt. Die ermittelten Werte sind mit Kennzahlen von Hydrosatzmaschinen aus der Erzaufbereitung vergleichbar [9].

Parameter	Werte
spezifischer Durchsatz	1,5 bis 3,9 t TS/(m ² *h)
Trennschärfe	gut
Prozesswassereinsatz	2,7–4,5 l Wasser / kg TS * 1,5–2,7 l Wasser / kg TS **

Tabelle 2:

Ermittelte Kennwerte der nassmechanischen Aufbereitung

* Einmalige Nutzung des Waschwassers während des Versuches

** Zweifache Nutzung des Waschwassers

Die mehrmalige Nutzung des Wassers führt wie erwartet zu einer Aufkonzentration von gelösten Stoffen und zu einer Erhöhung des Feststoffgehaltes im Prozesswasser. Negative Auswirkungen durch Mehrfachnutzung des Prozesswassers hinsichtlich der Produktqualitäten oder Trennschärfe konnten jedoch nicht festgestellt werden. Eine ausführliche Darstellung der Resultate der Prozesswasseranalyse und -reinigung ist nicht Bestandteil dieses Beitrages.

5. Produktqualitäten

Die im Rahmen des Deponierückbaus hergestellten Stoffströme sollten einer möglichst hohen Form der Verwertung zugeführt werden. Aus diesem Grund sollen hier gezielt Anforderungen diskutiert werden, welche bei Einhaltung dazu führen, dass aus dem ursprünglich als Abfall deklarierten Massenstrom ein Produkt generiert werden kann. Die Umwidmung vom Abfall zum Produkt erfolgt dabei nach § 5 des KrWG. Letztendlich gilt für Stoffströme aus dem Deponierückbau, welche z.B. Primärrohstoffe für die Bauindustrie oder Primärbrennstoffe ersetzen sollen, dass diese den gleichen Anforderungen wie Primärrohstoffe gerecht werden müssen.

Für die inerten Stoffströme Schwergut und Feingut soll hier zunächst der Einsatz im Straßenbau bzw. Erdbau diskutiert werden, da hier überwiegend Recyclingbaustoffe eingesetzt werden [9]. Grundanforderungen der Gesteinskörnungen und Baustoffgemische legt im Bereich Straßenbau die TL Gestein-StB fest, wobei umweltrelevante als auch bautechnische Anforderungen berücksichtigt werden. Die umweltrelevanten Anforderungen der TL-Gestein basieren dabei auf den Anforderungen der LAGA M20 für Bauschutt. Abweichungen der umweltrelevanten Anforderungen der TL-Gestein gegenüber der LAGA M20 sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 3: Grenzwerte für Feststoffgehalte nach LAGA M20 (2003) und TL-Gestein StB 04/07

Parameter	Einheit	Grenzwerte LAGA M 20 Bauschutt (2003)			TL Gestein-StB 04, Anhang D		
		Z1.1	Z1.2	Z2	RC1	RC2	RC3
Kohlenwasserstoff (C10 - C40)	mg/kg TS	300	500	1.000	300 ¹	300 ¹	1.000 ¹
Summe 16 PAK	mg/kg TS	5	15	75	5	45	75
Summe 6 PCB	mg/kg TS	0,1	0,5	1	0,1 ²	0,5 ²	1 ²

¹ Die angegebenen Werte gelten nur für Kohlenstoff-Verbindungen von C10 - C22. Überschreitungen, die auf Asphaltanteile zurückzuführen sind, stellen kein Ausschlusskriterium dar.

² Nachweisen nur bei spez. Verdacht

Das erzeugte Schwergut wurde zunächst nach LAGA M20 analysiert. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 4: Analyse nach LAGA für die Schwerstoffe 10–60 mm

Untersuchung nach LAGA Bauschutt							Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4
Parameter		Einheit	Grenzwerte				erreichte Klasse			
			Z0	Z1.1	Z1.2	Z2	Z 2	Z 1.2	Z 1.1	Z 1.2
Feststoff	Trockenmasse	Ma.-%	–	–	–	–	91,9	98,5	98,5	98,5
	Kohlenwasserstoffe C10-C40	mg/kg TS	100	300	500	1.000	210	210	230	200
	EOX	mg/kg TS	1	3	5	10	< 1	2	< 1	< 1
	Summe PAK (EPA)	mg/kg TS	1	5	15	75	6,38	9,24	1,47	3,64
	Summe 6 PCB	mg/kg TS	0,02	0,1	0,5	1	0,1	0,24	0,08	0,13
Eluat	pH-Wert	–	7–12	7–12	7–12	7–12	9,8	10,4	11	10,8
	el. Leitfähigkeit (25 °C)	µS/cm	500	1.500	2.500	3.000	1.040	378	448	360
	Chlorid	mg/l	10	20	40	150	25	16	16	11
	Sulfat	mg/l	50	150	300	600	457	81	64	44
	Phenolindex (wdf.)	µg/l	< 10	10	50	100	11	<10	<10	<10
	Arsen	µg/l	10	10	40	50	1	2	1	2
	Blei	µg/l	20	40	100	100	<1	<1	<1	<1
	Cadmium	µg/l	2	2	5	5	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3
	Chrom, gesamt	µg/l	15	30	75	100	<1	3	2	2
	Kupfer	µg/l	50	50	150	200	27	52	22	15
	Nickel	µg/l	40	50	100	100	2	3	2	<1
	Quecksilber	µg/l	0,2	0,2	1	2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
Zink	µg/l	100	100	300	400	<10	<10	<10	<10	

Für das Schwergut konnten Produktqualitäten nach LAGA M20 (Bauschutt) für die Klassen Z1.1 bzw. Z2 erreicht werden was unter Berücksichtigung der Tabelle 3 den nach Zuordnungskriterien RC 2 bzw. RC 3 nach TL-Gestein entspricht.

Das Feingut aus dem Zyklon wird über den Setzgutträger mit einer Maschenweite von 2 mm von dem Deponat abgeschieden und gelangt in das Prozesswasser, wo es anschließend mittels Zyklon ausgetragen wird. Das Feingut besteht zu 7 Prozent aus Feinkorn < 0,063 mm, zu 3 Prozent aus Grobkorn > 2 mm und zu 90 Prozent aus Mittelekorn (0,063–2 mm). Der Stoffstrom ist in seiner Zusammensetzung sehr homogen und erfüllt im Grundsatz die LAGA Zuordnungswerte für die Klasse Z2 (Tabelle 5). Eine Überschreitung der Z2-Werte wurde für Sulfat festgestellt, allerdings nur für den Stoffstrom, der aus dem Ausgangsmaterial < 25 mm erzeugt wurde. Ursache ist vermutlich der hohe Anteil der Fraktion < 10 mm.

Für das Feingut 10 – 60 mm konnten Produktqualitäten nach LAGA M20 für Bauschutt für die Klassen bzw. Z2 erreicht werden, was nach TL-Gestein den Zuordnungskriterien RC 3 entspricht.

Im Sinn des Arbeitsschutzes wird zusätzlich, gerade für Material aus Deponien, eine Analyse der einzelnen Stoffströme hinsichtlich Asbest empfohlen. Bei dem hier betrachteten Schwergut und Feingut konnte kein Asbest festgestellt werden.

Außer auf umweltrelevante Parameter wurden sowohl das Schwergut als auch das Feinmaterial in Hinblick auf bautechnische Mindestanforderungen durch eine Materialprüfanstalt für Baumaterial analysiert. In dieser ersten Untersuchung soll die generelle Eignung der Stoffströme als Baustoff untersucht werden. Die TL-Gestein-StB bzw. die TL Gestein –SoB StB stellt weiterhin, je nach Einsatzgebiet, Anforderungen an konkrete Korngrößenverteilungen, welche hier nicht Bestandteil der Untersuchung sein sollen.

Tabelle 5: Analyse nach LAGA für das Feinmaterial aus verschiedenen Versuchsdurchführungen für das Ausgangsmaterial < 25 mm, < 60 mm und 10–60 mm

Untersuchung nach LAGA Bauschutt							Ausgangsmaterial					
							< 25 mm			< 60 mm		10-60 mm
Parameter	Einheit	Grenzwerte				Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	
						erreichte Klasse						
		Z0	Z1.1	Z1.2	Z2	> Z2	> Z2	> Z2	Z2	Z2	Z2	
Feststoff	Trockenmasse	Ma.-%	–	–	–	–	74,2	72,1	79,3	98	80,8	78,1
	Kohlenwasserstoffe C10-C40	mg/kg TS	100	300	500	1.000	540	510	310	280	370	370
	EOX	mg/kg TS	1	3	5	10	<1	<1	<1	<1	4	3
	Summe PAK (EPA)	mg/kg TS	1	5	15	75	8	6,99	4,9	3,4	5,78	9,6
	Summe 6 PCB	mg/kg TS	0,02	0,1	0,5	1	0,26	0,9	0,17	0,62	0,78	0,77
Eluat	pH-Wert	–	7–12	7–12	7–12	7–12	7,6	7,7	7,7	7,9	8,4	8,1
	el. Leitfähigkeit (25 °C)	µS/cm	500	1.500	2.500	3.000	2.360	2.610	1.570	1.160	927	954
	Chlorid	mg/l	10	20	40	150	7	13	8	16	16	10
	Sulfat	mg/l	50	150	300	600	1.420	1.590	848	576	412	416
	Phenolindex (wdf.)	µg/l	< 10	10	50	100	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	Arsen	µg/l	10	10	40	50	1	<1	1	1	<1	1
	Blei	µg/l	20	40	100	100	<1	<1	<1	<1	<1	<1
	Cadmium	µg/l	2	2	5	5	0,6	0,6	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3
	Chrom, gesamt	µg/l	15	30	75	100	<1	<1	<1	2	3	2
	Kupfer	µg/l	50	50	150	200	66	55	18	42	44	54
	Nickel	µg/l	40	50	100	100	13	14	11	5	7	7
	Quecksilber	µg/l	0,2	0,2	1	2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
Zink	µg/l	100	100	300	400	140	140	60	20	30	20	

Die Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung sind zunächst in der Tabelle 6 dargestellt. Aus dem Schwergut wurden vor der Analyse größere Glas- als auch Metallteile per Hand aussortiert. Damit sollten die Aufbereitungsschritte zur FE-Abscheidung als auch zur Glasabtrennung berücksichtigt werden (Bild 7). Das Feinmaterial aus dem Zyklon wurde zunächst ohne weitere Aufbereitungsschritte analysiert.

Tabelle 6: Stoffliche Zusammensetzung nach TL-Gestein-StB

Stoffgruppe	Prozentualer Anteil jeder Stoffgruppe %		Soll nach TL-Gestein - StB 04/07, Anhang B
	Feinmaterial	Schwergut 10–60 mm	
Beton	16,1	23,8	Keine Angaben
natürlich und industriell hergestellte Gesteinskörnung	58,3	42,0	Keine Angaben
Klinker, Ziegel, Steinzeug	4,3	16,1	< 30,0
Ausbauasphalt	0,7	0,3	< 30,0
Kalksandstein	0,2	1,4	< 5,0
Mineralische Leicht- und Dämmbaustoffe	0,0	0,4	< 1,0
Fremdstoffe (Holz, Gummi, Folien, Kunststoff, Textilien u.a.m.)	2,5	1,7	< 0,2
Glas	17,1	9,4	Keine Angaben
Metalle	0,8	4,9	Keine Angaben

Die Analyseergebnisse zeigen, dass insbesondere der Fremdstoffanteil einen kritischen Parameter darstellt. Für die Komponenten Glas und Metalle gibt es keine konkreten Vorgaben.

Die Analyse der chemisch-physikalischen Parameter erfolgt gemäß den Anforderungen, welchen Schichten ohne Bindemittel, geregelt durch die technischen Lieferbedingungen für Schichten ohne Bindemittel (TL SoB-StB), unterliegen.

Wesentliche Anforderungen an die Kornform und den Widerstand gegen Zertrümmerung werden von dem Schwergut als grobe Gesteinskörnung eingehalten. Ein Einsatz des Schwergutes als Schotter- bzw. Kiestragschicht scheidet jedoch aus, da die Anforderungen bezüglich der gebrochenen Oberflächen nicht eingehalten werden können. Diese Anforderungen gelten nicht für feine Gesteinskörnungen, wie bspw. das Feingut. Die Einteilung in grobe und feine Gesteinskörnungen erfolgt dabei über die TL-Gestein. Einen kritischen Parameter bildet neben dem Fremdstoffgehalt auch das Wasseraufnahmevermögen. Wird dieser Parameter überschritten ist der Widerstand gegen Frostbeanspruchung zu bestimmen. Ursache für das Wasseraufnahmevermögen können neben dem Gehalt an saugfähigen Fremdstoffen auch Anhaftungen an der Partikeloberfläche sein, welche zu einem großen Anteil aus quellfähigen Ton bestehen.

Die beiden Stoffströme halten mit Ausnahme des Fremdstoffgehaltes und des Wasseraufnahmevermögens die bautechnischen Anforderungen weitgehend ein. Wird das ursprüngliche Aufbereitungskonzept (Bild 4) erweitert (Bild 7), so kann davon ausgegangen werden, dass der Fremdstoffanteil sowohl im Zyklonsand als auch der Feinanteil und damit der Anteil der Tonfraktion infolge integriertem Sandwäscher weiter gesenkt werden kann. Mit dem Einsatz eines z.B. Schwertwäschers zur Materialaufbereitung vor der Sortierung in der Setzmaschine, verbunden mit einer gleichmäßigen Beschickung, kann zudem die Sortierreinheit gesteigert bzw. der Fremdstoffgehalt im Schwergut gesenkt werden. Ob dieser jedoch auf weniger als

0,2 Prozent gesenkt werden kann, ist fraglich. Weiterhin scheint eine Reduzierung der Oberflächenanhaftungen durch den Eintrag mechanischer Energie realistisch. Insgesamt ist durch die Verfahrenserweiterung auch mit einer Steigerung der Produktqualität hinsichtlich umweltrelevanter Aspekte infolge der zusätzlichen Aufbereitung der einzelnen Stoffströme zu rechnen.

Tabelle 7: Bautechnische Anforderungen an Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau

TL-Gestein-StB Abschnitts-Nr.	Eigenschaft	Frostschuttschicht	Schotter-/Kiestragschicht	Deckschicht	Sand	Schwergut
	Baustoffgemische nach TL SoB-StB 04	0/2; 0/4; 0/5; 0/8; 0/11; 0/16; 0/22; 0/32; 0/45; 0/56; 0/63	0/32; 0/45; 0/56	0/8; 0/11; 0/16; 0/22; 0/32	0/2	10/60
2.1.1	stoffl. Kennzeichnung	ist anzugeben, stoffl. Zusammensetzung gemäß TL- Gestein, Anhang B sind einzuhalten			RC-Baustoff	RC-Baustoff
2.1.2	Rohdichte	ist anzugeben			2,54	2,55
2.2.2	Korngrößenverteilung					
	Korngruppen/ Lieferkörnung	G _{c,80} ; G _{c,80/20} G _{c,85} ; G _{c,85/20}			a)	
	zusammengefasste Korngruppen	G _{c,90/15} GT _{c,20/15} ; GT _{c,20/17,5}				
	Toleranz für Korngrößenverteilung	GT _A NR				
Gehalt an Feinanteilen						
2.2.3	Korngruppe/ Lieferkörnung 0/2 bis 0/5	f _{angegeben}			f _{2,4} (aus Sieblinie)	–
	Korngruppe/ Lieferkörnung 2/4 bis 32/63	f ₄		f _{angegeben}	f _{1,4} (aus Sieblinie)	
2.2.5	Kornform grober Gesteinskörnung	SI ₅₀ /FI ₅₀			–	SI ₅₀
2.2.6	Anteil gebrochener Oberflächen	C _{NR}	C _{90/3} ^{b)}	C _{NR}	–	C _{50/30}
2.2.9	Widerstand gegen Zertrümmerung	gesteinsbezogen gemäß Anhang A, TL-Gestein für RC-Baustoffe gilt SZ ₃₂		gesteinsbezogen gemäß, Anhang A TL-Gestein für RC-Baustoffe gilt SZ ₃₂		SZ ₃₂
2.2.14.1	Wasseraufnahme	W _{CM} = 0,5			3,2	3,1
2.2.14.2	Widerstand gegen Frostbeanspruchung	F _{4'} · F _{angegeben} ^{c)}	F _{4'} · F _{angegeben} ^{d)}	F ₄ ^{e)}	f _{6,7}	f _{23,8}
2.2.7	Fließkoeffizient				E _{CS} 35	–
2.4	umweltrelevante Anforderungen				RC 3	RC 2–RC 3

a) Keine Lieferkörnung gemäß TL-Gestein, deswegen keine Aussage möglich

b) gilt nur für Schottertragschichten

c) Bei RC-Baustoff ist nach TL SoB-StB 04, Abschnitt 2.2.1.2.2 eine Überschreitung der Kategorie F4 der TL-Gestein StB bis zu 10 Ma.-% möglich

d) Bei RC-Baustoff ist nach TL SoB-StB 04, Abschnitt 2.3.1.2 eine Überschreitung der Kategorie F4 der TL-Gestein StB bis zu 5 Ma.-% möglich

e) nach TL SoB-StB 04, Abschnitt 2.4.5 bestehen für Deckschichten keine nationalen Anforderungen an die Frostempfindlichkeit von Baustoffe

Die TL BuB E-StB 09 regelt die Anforderungen für Baustoffe im Straßenbau für Boden- und Erdarbeiten. Hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung als auch der umweltrelevanten Aspekte gelten die Anforderungen der TL Gestein – StB 04/07. Weitere Anforderungen bestehen bezüglich dem Wassergehalt, der Plastizität und der Partikelgrößenverteilung. Die Klassifikation für bautechnische Zwecke erfolgt anschließend nach der DIN 18196. Nach ersten Abschätzungen ist dabei der Einsatz des Schwergutes als Drainage oder Hinterfüllmaterial denkbar. Für das Feingut scheint ein Einsatz als Bankettmaterial möglich, soweit keine Anforderungen an die Standfestigkeit gestellt werden, sowie als Dichtungsschicht.

Eine höherwertige Verwertungsstrategie für das Leichtgut stellt die Verbrennung in Form von Sekundärbrennstoff dar. Grenzwerte dafür definiert die Bundesgütegemeinschaft durch das RAL-Gütezeichen 724 für Sekundärbrennstoffe, wobei umweltrelevante Aspekte wie z.B. Schwermetallgehalte, aber auch verfahrenstechnisch relevante Parameter wie bspw. Chlorgehalte berücksichtigt werden.

Das erzeugte Leichtgut setzt sich hauptsächlich aus Folien, Hartkunststoff, Holz und Textilien zusammen. Der Stoffstrom weist noch Anhaftungen vorwiegend mineralischen Ursprunges auf, was zu einem Aschegehalt dieser Fraktion von etwa 18,5 Prozent führt (Tabelle 8). Durch weitere Waschversuche im Labormaßstab konnten z.B. die Aschegehalte durch das fast vollständige Entfernen der Anhaftungen von 18,5 auf 9 Prozent gesenkt werden. Gleiche Erkenntnisse liefern auch anderweitige Untersuchungen zu Kunststoffen aus Deponien [12]. Analysen des Leichtgutes (Tabelle 8) lieferten weiterhin Ergebnisse, die eine Verwertung dieser Fraktion als Ersatzbrennstoff möglich erscheinen lassen. Bezogen auf die SBS Qualitätskriterien werden hier, nach nochmaligem Waschen des Materials im Labor, lediglich die Cadmium-Werte überschritten.

Die Fraktion < 10 mm wurde hinsichtlich der Ablagerungsparameter nach DepV. analysiert. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst. Insgesamt werden hier, mit Ausnahme des Glühverlustes und des TOC-Gehaltes, die Grenzwerte für die Deponieklasse DK I eingehalten. Gemäß DepV. § 6 Abs. 6 [1] ist der Wiedereinbau von Deponat aus Deponierückbaumaßnahmen am gleichen Standort, auch bei Überschreiten des Glühverlustes oder TOC-Gehaltes, mit Zustimmung der zuständigen Behörde rechtlich gegeben. Inwieweit die Fraktion < 10 mm aufgrund der Analyseergebnisse (Tabelle 9) auf Deponieabschnitten der Klasse DK I abgelagert werden darf, ist mit der zuständigen Behörde zu klären.

Die Fraktion < 10 mm weist trotz überschrittener Glühverlust- und TOC-Grenzwerte nur sehr niedrige Atmungsaktivitäten bzw. Gasbildungsraten auf. Auch der Energiegehalt fällt sehr niedrig aus (Tabelle 9). Eine Deponierung der Fraktion < 10 mm auf der Deponieklasse DK1 erscheint daher vertretbar, da die Schutzziele im Bereich Umwelt und Ressourcen erfüllt werden.

Tabelle 8: Qualitäten des gewonnenen Leichtgutes im Vergleich zu Anforderungen an EBS und SBS nach BGS RAL Gütezeichen

Parameter	Einheit	Leichtgut (10-60 mm)	Leichtgut (10-60 mm) gewaschen	Mitverbrennung Kohlekraftwerke, Zementwerke *	Monoverbrennung EBS-Kraftwerke, Rostfeuerung *	RAL-GZ 724	
				SBS-Qualitäts- geprüft	EBS	Median	80%- Perzentil
Gesamtwasser	Ma.-% OS	22,4	39,9	> 12–25	> 12 – > 40	zu dokumentieren	
Aschegehalt 550 °C	Ma.-% OS	18,5	9,0	15–25	< 20 – < 40	zu dokumentieren	
Schwefel gesamt	Ma.-% OS	2,52	1,47	0,5–1,5	0,7–1	–	–
Heizwert (Hu)	MJ/kg TS	22,57	27,01	–	–	zu dokumentieren	
Heizwert (Hu)	MJ/kg OS	16,97	15,26	16–21	> 8 – < 18	zu dokumentieren	
Chlor gesamt	Ma.-% OS	3,7	1,3	0,5–1	0,9–2	zu dokumentieren	
Antimon	mg/kg TS (mg/MJ TS)	36 (1,59)	177 (6,5)	–	–	(3,1)	(7,5)
Arsen	mg/kg TS (mg/MJ TS)	5,4 (0,23)	1,9 (0,07)	13–17	20–25	(0,31)	(0,81)
Blei	mg/kg TS (mg/MJ TS)	1020 (45,19)	206 (7,6)	200–360	400–800	(12)	(25)
Cadmium	mg/kg TS (mg/MJ TS)	32 (1,4)	38 (1,4)	9–17	4–20	(0,25)	(0,56)
Chrom	mg/kg TS (mg/MJ TS)	118 (5,28)	33 (1,22)	120–500	400–500	(7,8)	(16)
Kobalt	mg/kg TS (mg/MJ TS)	6 (0,26)	4 (0,14)	12–17	20–30	(0,38)	(0,75)
Kupfer	mg/kg TS (mg/MJ TS)	4.110 (182)	3.880 (143,6)	300–1.200	400–1.000	zu dokumentieren	
Mangan	mg/kg TS (mg/MJ TS)	164 (7,26)	112 (4,14)	100–500	330–500	(16)	(31)
Nickel	mg/kg TS (mg/MJ TS)	33 (1,46)	34 (1,26)	50–160	80–200	(5)	(10)
Quecksilber	mg/kg TS (mg/MJ TS)	1,1 (0,048)	0,26 (0,0096)	1–1,8	0,6–2	(0,038)	(0,075)
Thallium	mg/kg TS (mg/MJ TS)	< 0,2 (< 0,0088)	< 0,2 (< 0,0074)	2–9	1–10	(0,063)	(0,13)
Vanadium	mg/kg TS (mg/MJ TS)	17 (0,75)	10 (0,37)	–	–	(0,63)	(1,6)
Zinn	mg/kg TS (mg/MJ TS)	50 (2,2)	27 (0,99)	–	–	(1,9)	(4,4)

* Scheelhaase, T.; Semisch, C.: Zukunft Verbrennen? - von der Abfallverbrennung hin zur Wertstoffschöpfung nach Cradle to Cradle, EPEA Internationale Umweltforschung GmbH, Hamburg (2008)

		Grenzwerte			Deponat < 10 mm
Parameter	Einheit	DK I	DK II	DK III	
Trockenmasse	Ma.-%				76,3
Glühverlust	Ma.-% TS	3	5	10	20,8*
TOC	Ma.-% TS	1	3	6	9,0
lipophile Stoffe	Ma.-% OS	0,4**	0,8	4	0,38
pH-Wert	ohne	5,5–13	5,5–13	4–13	7,6
DOC	mg/l	50	80	100	19
Phenolindex	mg/l	0,2	50	100	< 0,010
Chlorid	mg/l	1.500	1.500	2.500	25
Sulfat	mg/l	2.000	2.000	5.000	784
Cyanid, leicht freisetzbar	mg/l	0,1	0,5	1	< 0,005
Fluorid	mg/l	5	15	50	< 2
Gesamtgehalt an gelösten Feststoffen	mg/l	3.000	6.000	10.000	1.400
Arsen	mg/l	0,2	0,2	2,5	< 0,001
Blei	mg/l	0,2	1	5	0,001
Cadmium	mg/l	0,05	0,1	0,5	0,0004
Kupfer	mg/l	1	5	10	0,057
Nickel	mg/l	0,2	1	4	0,022
Quecksilber	mg/l	0,005	0,02	0,2	< 0,0002
Zink	mg/l	2	5	20	0,17
Barium	mg/l	5	10	30	0,109
Chrom gesamt	mg/l	0,3	1	7	0,002
Molybdän	mg/l	0,3	1	3	0,023
Antimon	mg/l	0,03	0,07	0,5	0,007
Selen	mg/l	0,03	0,05	0,7	< 0,001
AT ₄	mgO ₂ /gTS	–	5	–	0,33–0,71
GB21	NI/kgTS	–	20	–	0,04–0,13
verbrennungstechnische Eigenschaften					
Aschegehalt 550 °C	Ma.-% OS		67,8		
Brennwert (H _v)	MJ/kg OS		5,3		
Heizwert (H _v)	MJ/kg OS		4,77		
Schwefel gesamt	Ma.-% OS		5,28		
Chlor gesamt	Ma.-% OS		1,2		

* Grenzwerte überschritten – unterstrichene Werte

** Grenzwerte eingehalten – fett markiert

Tabelle 9:

Grenzwerte für Wiederablagerung der Fraktion < 10 mm nach DepV

6. Ausblick

Mit der nassmechanischen Aufbereitung von Deponat < 60 mm konnten im halbtechnischen Maßstab positive Ergebnisse in Hinblick auf eine Verwertung erzielt werden. Das Verfahren liefert gute Sortier- und Aufbereitungsergebnisse und ist einfach zu betreiben, bietet die notwendige Robustheit sowie einen geringen Energieverbrauch.

Auch über den eigentlichen Anwendungsbereich der verwendeten Maschine hinaus, der bei einer maximalen Korngröße von 35 mm lag, war eine Stoffstromtrennung für alle untersuchten Materialien gegeben.

Die Partikel der einzelnen Stoffströme waren auch nach der nassmechanischen Aufbereitung noch geringfügig mit feinen Anhaftungen überzogen, die die gewünschten Produktqualitäten beeinflussen. Mittels einer dem Setzprozess vorgeschalteten Aufbereitung, z.B. durch Schwertwäscher oder Läutertrommeln, können die zu erreichenden Produktqualitäten weiter gesteigert werden. Auf diese vorgeschaltete Aufbereitung, wie sie bei der Nassaufbereitung im Allgemeinen üblich ist, wurde im Rahmen dieser Versuchsdurchführungen zunächst verzichtet. Entsprechende weiterführende Untersuchungen sind im weiteren Verlauf des FuE-Vorhabens vorgesehen.

Auf Grundlage der vorliegenden Daten kann folgende Einschätzung gegeben werden:

- Das Schwergut kann hinsichtlich umweltrelevanter Aspekte als Ersatz- oder Deponiebaustoff verwendet werden. Aufgrund der inhomogenen Zusammensetzung des Schwergutes scheint hier eine Verwertung, gerade hinsichtlich bautechnischer Anforderungen, allerdings schwieriger. Das Abscheiden des enthaltenen Glases, das einer Verwertung zugeführt werden kann, ist notwendig.
- Der Sand aus dem Zyklon kann ebenfalls hinsichtlich umweltrelevanter Aspekte als Ersatz- oder Deponiebaustoff verwendet werden. Eine weitere in den Prozess integrierte Aufbereitung des Feinmaterials z.B. mittels Sandwäscher wird empfohlen, dabei kann der Glühverlust bzw. Schadstoffgehalt weiter gesenkt und die Produktqualität gesteigert werden und ein Einsatz des Stoffstromes aufgrund bautechnischer Anforderungen erscheint möglich.
- Die aufbereitete Leichtfraktion aus der Feinfraktion eignet sich für die energetische Verwertung, dies betrifft zunächst den Einsatz in EBS-Kraftwerken.
- Die Fraktion < 10 mm weist trotz überschrittener Glühverlust- und TOC-Grenzwerte nur sehr niedrige Atmungsaktivitäten und Gasbildungsraten auf. Auch der Energiegehalt fällt sehr niedrig aus. Da die Schutzziele im Bereich Umwelt und Ressourcen hinreichend erfüllt werden, ist eine Deponierung der Fraktion < 10 mm auf der Deponieklasse DK1 vertretbar.
- Allein durch die Aufbereitung der Feinfraktion 10–60 mm kann eine Volumenreduktion um etwa 46 Prozent erreicht werden. Wird lediglich die Fraktion < 10 mm wieder abgelagert, sind Volumengewinne zwischen 70–80 Prozent realistisch.
- Die nassmechanische Aufbereitung mittels Setzmaschinenteknik im halbtchnischen Versuchsmaßstab entspricht hinsichtlich der ermittelten Kennwerte (Tabelle 2) den in der Erzaufbereitung eingesetzten Verfahren [9].

Das nachfolgende Bild 7 zeigt anhand eines Verfahrensfließbildes, wie sich die nassmechanische Aufbereitung des Feinmaterials in der Praxis umsetzen lassen könnte.

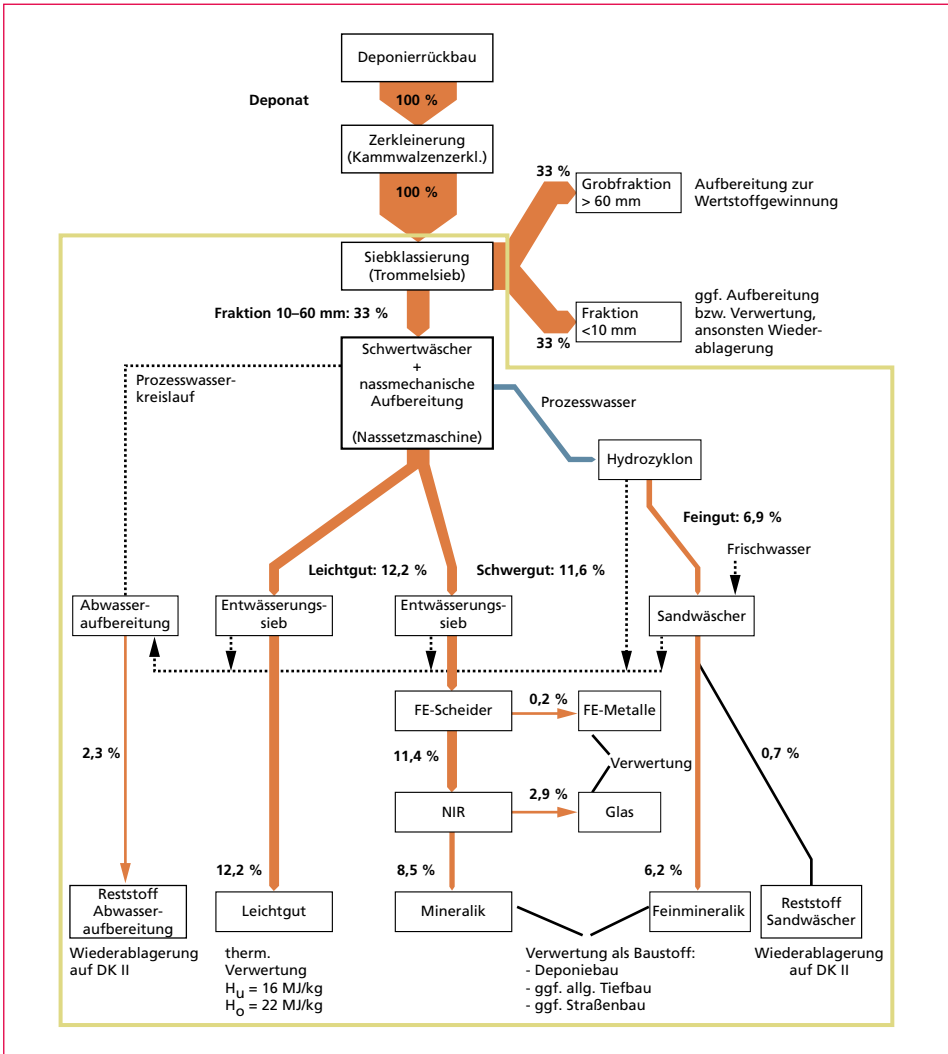


Bild 7: Wesentliche Stoffflüsse und Verwertungsmöglichkeiten der Feinfraktion infolge nass-mechanischer Aufbereitung

Mittels nassmechanischer Aufbereitung der Feinfraktion < 60 mm können Ressourcen verfügbar gemacht und Deponievolumen gewonnen werden (Bild 7). Nach einer ersten Abschätzung ergeben sich für die Aufbereitung der Feinfraktion 10–60 mm – gerahmter Bereich nach Bild 7 – spezifische Aufbereitungskosten von 7–10 EUR/Tonne FS (Tabelle 10). Die Abschreibungsdauer für die Aufbereitungsanlage mit den nachgeschalteten Aggregaten (Bild 7) wurde konservativ mit 6 Jahren veranschlagt und entspricht damit auch der Dauer der Rückbaumaßnahme, wenn das gesamte Inventar der in der Beispieldeponie enthaltenen Fraktion 10–60 mm – etwa 525.800 Tonnen –, bei einem Materialdurchsatz von 50 Tonnen/h – 7 h/d bei 260 d – aufbereitet wird. Mögliche Erlöse durch das aufbereitete Material wurden hierbei nicht berücksichtigt.

Parameter	Wert	Einheit
Durchsatz (90.000 t/a)	50	t/h
Betriebsstunden	1.800	h/a
Dauer der Rückbaumaßnahme	5,8	a
Investitionskosten	919.000	EUR
Abschreibungsdauer (mobiles Gerät)	6	a
Zinssatz	4	%
Annuität	175.310	EUR/a
variable Kosten		
Personalkosten 1 x Maschinenführer/ 2 x Arbeiter/ 1 x Ingenieur (4 h/Woche)	107.500	EUR/a
RWU (6 % der Investitionskosten)	55.140	EUR/a
Wiederablagerung der Reststoffe (25 EUR/t)	157.500	EUR/a
sonstiges (Energie/Wasser/Abwasser)	118.698	EUR/a
Summe der Gesamtkosten	614.148	EUR/a
spezifische Aufbereitungskosten	6,82	EUR/t FS

Tabelle 10:

Berechnung der spezifischen Aufbereitungskosten

7. Literatur

- [1] Deponieverordnung (DepV): Verordnung über Deponien und Langzeitlager vom 27. April 2009, zuletzt geändert durch den Artikel 7 der Verordnung vom 2. Mai 2013
- [2] DWA: DWA-Themen, Rückbau von deponierten Abfällen. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 2012
- [3] Friedmann, H.; Zollner, S.: Behandlung und Verwertung von Altmüll aus dem Deponierückbau, 1995. Abfallwirtschafts Journal 7: Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, Berlin, 1995, S. 76-81
- [4] Gäth, S.; Nispel, J.: Ressourcenpotential von ausgewählten Hausmülldeponien in Deutschland. Müll und Abfall, 2/2011: Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. Kg, Berlin, 2011, S. 61-67
- [5] Landesanstalt für Umweltschutz: Handbuch Bodenwäsche. 1. Auflage. Landesanstalt für Umweltschutz, Karlsruhe, 1993
- [6] Müller, A.; Wienke, L.: Untersuchungen zur Optimierung der Setzmaschinenteknik. Ratgeber Abbruch & Recycling, Stein-Verlag Baden-Baden GmbH, 2004
- [7] Röth, D.: Einsatzpotentiale von mineralischen Baustoffen in Theorie und Praxis. Müll und Abfall, 20/2015: Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. Kg, Berlin, 2015, S. 559-563
- [8] Scheelhaase, T.; Semisch, C.: Zukunft Verbrennen?- von der Abfallverbrennung hin zur Wertstoffschöpfung nach Cradle to Cradle, EPEA Internationale Umweltforschung GmbH, Hamburg, 2008
- [9] Schubert, S.: Aufbereitung fester Stoffe, Band II Sortierprozesse. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart, 1996, S. 41-73
- [10] Umweltbundesamt: Deponierückbau- Wirtschaftlichkeit, Ressourcenpotential und Klimarelevanz, Reports, REP-0378 Umweltbundesamt, Wien, 2011
- [11] Van Vossen, W.J.; Prent, O.J.: Sardinia Symposium 2011, Feasibility Study Sustainable Material And Energy Recovery From Landfills In Europe, Sardinia, 2011
- [12] Zhou, C.; Fang, W.; Xu, W.; Cao, A.; Wang, R.: Characteristics and the recovery potential of plastic wastes obtained from landfill mining. Journal of Cleaner Production, 80/2014, S. 80-86

Mineralische Nebenprodukte und Abfälle



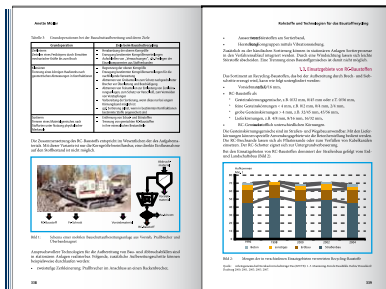
Herausgeber: Karl J. Thomé-Kozmiensky • Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Mineralische Nebenprodukte und Abfälle – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –

ISBN: 978-3-944310-11-4
 Erschienen: Juni 2014
 Gebundene Ausgabe: 574 Seiten
 mit zahlreichen
 farbigen Abbildungen
 Preis: 50.00 EUR

Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2 – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –

ISBN: 978-3-944310-21-3
 Erschienen: Juni 2015
 Gebundene Ausgabe: 782 Seiten
 mit zahlreichen
 farbigen Abbildungen
 Preis: 50.00 EUR



Bestellungen unter www.vivis.de
 oder

Dorfstraße 51
 D-16816 Nietwerder-Neuruppin
 Tel. +49.3391-45.45-0 • Fax +49.3391-45.45-10
 E-Mail: tkverlag@vivis.de

vivis
 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky