



INSTITUT FÜR ENERGIE-
UND UMWELTFORSCHUNG
HEIDELBERG



Zentrum für Angewandte
Geowissenschaften (ZAG)

**Heinrich Feeß GmbH & Co. KG
Heinkelstr. 2
73230 Kirchheim/Teck**

Vorhaben:

„Entwicklung eines Verfahrens zur vollständigen Aufbereitung und hochwertigen Verwertung von Boden- und Bauschuttmaterial für ressourcenschonende Baustoffe“

**Abschlussbericht über ein FuE-Projekt,
gefördert unter dem Aktenzeichen AZ 32046/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

von:

**Walter Feeß
Tel.: 07021 9859-8
Mail: info@feess.de**

Kirchheim/Teck, den 31.03.2020

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	32046	Referat	01-23	Fördersumme	514.048,00 €
----	--------------	---------	--------------	-------------	---------------------

Antragstitel Entwicklung eines Verfahrens zur vollständigen Aufbereitung und hochwertigen Verwertung von Boden- und Bauschuttmaterial für ressourcenschonende Baustoffe

Stichworte Verfahren, Dekontamination, Maschine, Schadstoff, Boden

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
30 Monate	29.06.2017	31.12.2019	--

Zwischenberichte alle 6 Monate Kurzbericht

Bewilligungsempfänger	Heinrich Feeß GmbH & Co. KG Heinkelstr. 2 73230 Kirchheim/Teck	Tel	07021 9859 - 8
		Fax	07021 9859-64
		Projektleitung	Herr Walter Feeß

Bearbeiter	MH-KP-SR-EF
------------	-------------

Kooperationspartner ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH
Ansprechpartner: Herr Florian Knappe
Wilckensstraße 1
69120 Heidelberg

IAB Institut für angewandte Bauforschung Weimar gGmbH
Ansprechpartner: Frau Prof.-Ing. Anette Müller
Über der Nonnenwiese 1
99428 Weimar

Zentrum für Angewandte Geowissenschaften (ZAG)
Ansprechpartner: Herr Dr. Bernd Susset
Hölderlinstr. 12
72074 Tübingen

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

In Zukunft wird der Anteil problematischer Ausgangsmaterialien aus Siedlungsschutt und Altstraßenschotter weiter zunehmen. Bislang ist die Recyclingwirtschaft hierauf nicht ausgerichtet. 80 % dieser Materialien gelangen in einfache Ablagerungsmaßnahmen oder Deponien, da sich die Materialien mit der heutigen Technik nicht wirtschaftlich aufbereiten lassen. Oftmals sind Schadstoffe von organischen Bodenbestandteilen fest gebunden, sodass die klassische Bodenwäsche die Kontaminanten nicht entfernen kann.

Die bereits bekannte Bodenwäsche zielt auf eine Reduzierung der organischen Belastung von Böden ab. Über die Schwertwäsche soll zusätzlich eine gezielte Aufbereitung eines typischen Siedlungsschutts erfolgen und damit Alternativen zur Entsorgung von Boden und Steinen auf Deponien oder Verfüllmaßnahmen aufgezeigt werden. Diese Möglichkeit soll mit dem vorliegenden Forschungsprojekt ausgearbeitet werden.

Bei der Nassklassierungsanlage der Heinrich Feeß GmbH & Co. KG (nachfolgend Feess genannt) handelt es sich um eine Schwertwäsche mit integrierter Nassklassierung. Diese verspricht Lösungen für die

Aufgabenstellung, möglichst hohe Anteile des Abfallmassenstroms in den Materialkreislauf zurückzuführen.

Über die Schwertwäsche ist es möglich, Massenströme wie Gemische aus Bauschutt und Boden in die Teilfraktionen steinig, sandig und lehmig aufzutrennen und damit zu homogenen Teilmassenströmen aufzubereiten. Dies ist die Voraussetzung, um die Materialien als sekundäre Rohstoffe wieder in die Baustoffherstellung zurückführen zu können. Der technische Verfahrenssatz verspricht zusätzlich eine Aufbereitung von eher problematischen Abfallmassen. Durch die Bodenwäsche werden die Materialien gewaschen und von Schadstoffen wie Sulfat oder anderen Störstoffen getrennt.

Mit dem Forschungsprojekt gilt es, Massenströme im Output der Anlage zu produzieren, die möglichst nahe an die Spezifikationen der Baustoffindustrie heranreichen sollten, um dort als Rohstoffe möglichst gleichwertig zu Primärrohstoffen verwendet werden zu können. Dies kann nur durch ein Zusammenspiel aus Anpassung der Aufbereitungstechnik und geeignetem Inputmaterial erreicht werden.

Ein weiteres Ziel besteht in der Schaffung eines konkreten Datensatzes für nach modernen Nassklassierungsverfahren aufbereiteten Materialfraktionen, um gesicherte Aussagen über deren Umweltqualität zu erhalten. Dabei wurden auch die Stoffkonzentrationen von Waschwässern aus der Anlage kontrolliert. Zwischenergebnisse wurden mit dem Betriebsleiter der Anlage ausgetauscht, um Verbesserungsmöglichkeiten im Betriebsablauf und in den technischen Verfahrensschritten der Nassklassierung zu erörtern.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Folgende Arbeitsschritte werden durchgeführt:

AP 1: Recherche

AP 2: Konzeption/Durchführung von Vorversuchen

AP 3: Durchführung von Aufbereitungsversuchen bzw. Erarbeitung der Aufbereitungsstrategie

AP 4: Charakterisierung der verschiedenen Massenströme bzw. Erarbeitung der Verwertungsstrategie

AP 5: Zusatz von Schlamm bei der Ziegelherstellung

AP 6: Zusatz von Schlamm bei der Zementherstellung

AP 7: Rezepturenentwicklung für ein Verfüllmaterial im Rohrleitungsbau

AP 8: Validierung der Aufarbeitungs- bzw. Verwertungsstrategie

AP 9: Erstellung der Projektdokumentation

Ergebnisse und Diskussion

In der Bodenaufbereitungsanlage der Firma FEESS werden Gleisschotter und Boden-Bauschutt-Gemische aufbereitet. Ziel ist die Erzeugung von vermarktbareren Produkten. Dieses Ziel kann für die Splitte und Sande erreicht werden. Sie eignen sich aufgrund ihrer physikalischen und stofflichen Eigenschaften sowie wegen ihres großen Anteils an natürlichen Gesteinskörnungen für die Betonherstellung. Verbesserungen hinsichtlich einer Vergleichmäßigung der Eigenschaften sind durch eine Homogenisierung des Ausgangsmaterials oder der Produkte realisierbar. Mit dieser technologischen Maßnahme ließe sich auch ein einheitlicheres Erscheinungsbild dieser Produkte erreichen.

Die hervorstechenden Eigenschaften der Schluffe sind der hohe Wassergehalt, die hohe Feinheit und die vergleichsweise geringen Schwankungsbreiten der Eigenschaften. Der Einsatz als Magerungs- und/oder Porosierungsmittel für wärmedämmende Hochlochziegel in der Ziegelindustrie wäre denkbar. Dazu sind Untersuchungen mit der Grundmasse des in Frage kommenden Ziegelherstellers durchzuführen. Die Herstellung von Flüssigböden stellt eine weitere Verwertungsoption dar. Dafür eignen sich sowohl die Sande als auch die Schluffe.

Als weiterer Verwertungsweg für den Schluff kommt die Herstellung von Aufbaukörnungen, d. h. thermisch verfestigten Granulaten aus Mauerwerkbruch, die in ihren Eigenschaften mit Blähtonen vergleichbar sind, in Frage. Infolge des hohen Feuchtegehalts des Materials kommt aus energetischen Gründen aber nur eine gemeinsame Verarbeitung mit einer zweiten - möglichst trockenen Komponente - in Frage.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Erkenntnisse fließen in die hauseigenen Kreislaufwirtschaftsseminare mit ein und werden auch bei Referaten, welche Walter Feeß abhält vorgetragen. Es wird zudem Veröffentlichungen in Fachmagazinen zu diesem Thema geben, wenn die passenden Themenumfelder gegeben sind.

Fazit

Grundsätzlich sind die Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt durchaus ermutigend. Mithilfe einer optimierten Aufbereitungstechnik und anderen standortbezogenen Faktoren verspricht dieser Ansatz der Verwertung des großen Abfallmassenstroms Boden und Steine durchaus Lösungen. Um die erforderliche Rohstoffeffizienz zu erreichen, müssen Böden als Rohstoffe verstanden und entsprechend aufbereitet in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt werden.

Inhaltsverzeichnis:

Projektkennblatt	2
1. Hintergrund / Aufgabenstellung / Herangehensweise im Projekt ..	8
1.1. Hintergrund	8
1.2. Aufgabenstellung / Herangehensweise im Projekt	11
1.3. Inhaltliche Änderung / Laufzeitverlängerung	14
2. Kurze Beschreibung	15
2.1 Ausgangssituation im Projekt – Anlagentechnik	15
2.2 Rechtliche und fachliche Grundlagen.....	16
2.3 Material und Methoden	22
3. Messergebnisse zur Identifizierung bewertungs- und regelungsrelevanter Parameter	36
3.1 Statistische Auswertung der Messergebnisse zur Identifizierung bewertungs- und regelungsrelevanter Parameter	36
3.2 Bewertungs- und regelungsrelevante Stoffe und Parameter für nassklassierte Fraktionen aus rezyklierten Boden-Bauschutt- Gemischen (RBB).....	37
3.3 Bewertungs- und regelungsrelevante Stoffe und Parameter für nassklassierte Fraktionen aus Gleisschottermaterialien (GS)	45
3.4 Bewertung der gefundenen Stoffkonzentrationen nach geplanter Mantelverordnung des BMUB (Regierungsentwurf der MantelV, BMUB 2017), Klassifizierung und Ableitung von Verwertungsmöglichkeiten.....	53
4. Verwertungsoptionen	63
4.1 Erscheinungsbild der Schluffe und Sande	63
4.2 Physikalische Parameter.....	66
4.3 Chemische und mineralogische Parameter.....	68
4.4 Auswahl von Verwertungswegen	72
4.5 Optionen zur Verwertung der Gesteinsfraktionen	75
4.6 Optionen aus der Verwertung der Sandfraktion.....	78
4.7 Optionen aus der Verwertung der Schlufffraktion	84
5. Die Optionen aus ökologischer Sicht	93
5.1 Bilanzrahmen und Daten	93
5.2 Bewertungsmethode.....	95
5.3 Ergebnisse.....	97
6. Schlussfolgerungen	107
6.1 Verwertung von Gleisschotter	107
6.2 Verwertung von Böden und Boden-Bauschuttgemischen.....	108
7. Zusammenfassung und Ausblick	109
Literaturverzeichnis	111

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufgabematerial Gleisschotter	22
Abbildung 2: Gleisschotter mit Mikroplastik.....	22
Abbildung 3: Bodenaushub aus Kalk-Mergel	23
Abbildung 4: Boden-Bauschutt-Gemisch	23
Abbildung 5: Probenteilung mit Riffelteiler	28
Abbildung 6: Schematischer Aufbau von dynamischen Elutionsverfahren (Säulenversuche, hierzu zählen auch Lysimeterversuche).....	29
Abbildung 7: Säulenversuchsaufbau im Labor. Eigene Photographie des ZAG Tübingen.	30
Abbildung 8: Klassifizierung der nassklassierten Fraktionen von RBB nach geplanter EBV: Überschreitungen der BM-F0* von Metallen in WF 2-Eluaten treten nur vereinzelt auf und liegen deutlich unter den BM-F1 und RC-1 Werten.....	54
Abbildung 9: Klassifizierung der nassklassierten Fraktionen von RBB nach geplanter EBV, Materialwerte im WF 2-Eluat: Überschreitungen der BM-F0* - Materialwerte für die $\Sigma 15$ EPA PAK treten in WF 2-Eluaten aller nassklassierten Schluff und Sandfraktionen der RBB 1 bis 5 auf, liegen aber immer deutlich unter RC-1.....	55
Abbildung 10: Klassifizierung der nassklassierten Fraktionen von RBB nach geplanter EBV, Materialwerte im Feststoffgehalt: Überschreitungen der BM-F0* - Materialwerte für die $\Sigma 15$ EPA PAK treten in WF 2-Eluaten aller nassklassierten Schluff und Sandfraktionen der RBB 1 bis 5 auf, liegen aber immer deutlich unter RC-1.....	57
Abbildung 11: Klassifizierung der nassklassierten Fraktionen von GS nach geplanter EBV: Nur eine einzelne Überschreitung des BM-0*- oder BM-F0*-Wertes von Kupfer im WF 2-Eluat von GS-2.	59
Abbildung 12: Klassifizierung der nassklassierten Fraktionen von GS nach geplanter EBV, Materialwerte im WF 2-Eluat: Überschreitungen der BM-F0* - Materialwerte für die $\Sigma 15$ EPA PAK treten in WF 2-Eluaten aller nassklassierten Schluff und Sandfraktionen der RBB 1 bis 5 auf, liegen aber immer deutlich unter RC-1.....	59
Abbildung 13: Klassifizierung der nassklassierten Fraktionen von GS nach geplanter EBV, Materialwerte im WF 2-Eluat: Überschreitungen der GS-1 - Materialwerte für die Herbizide Diuron, Glyphosat und AMPA treten insbesondere in WF 2- Eluaten der nassklassierten Schluff- und Sandfraktionen der Gleisschotter auf. Nassklassierte Splittfraktionen liegen immer deutlich unter GS-1.....	60
Abbildung 14: Klassifizierung der nassklassierten Fraktionen von GS nach geplanter EBV, Materialwerte im Feststoffgehalt:	

Überschreitungen der BM-F2 und BM-F3 - Materialwerte für die $\Sigma 15$ EPA PAK treten im Feststoff aller nassklassierten Schluff und Sandfraktionen der GS 1 bis 2 auf.	62
Abbildung 15: Aufgabematerial Gleisschotter: Getrockneter Schluff (Probe 17642)	63
Abbildung 16: Aufgabematerial Gleisschotter: Getrockneter Schluff (Probe 17643)	64
Abbildung 17: Aufgabematerial Gleisschotter: Sande (Probe 17646)	64
Abbildung 18: Aufgabematerial Gleisschotter: Sande (Probe 18509)	64
Abbildung 19: Aufgabematerial Boden-Bauschutt-Gemisch: Getrockneter Schluff (Probe 17640)	65
Abbildung 20: Aufgabematerial Boden-Bauschutt-Gemisch: Sande (Probe 17644)	65
Abbildung 21: Aufgabematerial Boden-Bauschutt-Gemisch: Sande (Probe 17645)	65
Abbildung 22: Aufgabematerial Boden-Bauschutt-Gemisch: Sande (Probe 18514)	66
Abbildung 23: Partikelgröße x_{90} für die Schluffe aus der Aufbereitung der Boden-Bauschutt-Gemische bzw. den Gleisschottern	67
Abbildung 24: Partikelgröße x_{90} für die Sande aus der Aufbereitung der Boden-Bauschutt-Gemische bzw. den Gleisschottern	67
Abbildung 25: Partikelgrößenverteilung der Splitte aus der Aufbereitung der Boden-Bauschuttgemische	68
Abbildung 26: Dichten der Sande aus der Aufbereitung der Bauschutt-Boden-Gemische	68
Abbildung 27: Berechnete CaCO_3 -Gehalte der Produkte aus der Aufbereitung des Gleisschotters	69
Abbildung 28: Berechnete CaCO_3 -Gehalte des Aufgabematerials und der Produkte aus der Aufbereitung der Boden-Bauschutt-Gemische	71
Abbildung 29: Hauptoxide und SO_3 -Gehalt der Produkte aus der Aufbereitung der Boden-Bauschutt-Gemische	72
Abbildung 30: Haldenaufbau zur Vorhomogenisierung von Schüttgütern nach der Chevron-Methode (oben) bzw. nach der Windrow-Methode (unten), entnommen aus [4]	74
Abbildung 31: Abgrenzung der Bereiche günstiger Korngrößenzusammensetzung von Ziegeltonen [23]	85
Abbildung 32: Bilanzrahmen für die ökologische Betrachtung der Wäsche und des Status Quo	94
Abbildung 33: Treibhauseffekt für die Behandlung des Bodenbauschuttgemisches	98
Abbildung 34: fossiler kumulierter Energieaufwand (KEA fossil) für die Behandlung des Bodenbauschuttgemisches	99

Abbildung 35: Terrestrisches Eutrophierungspotenzial für die Behandlung des Bodenbauschuttgemisches.....	99
Abbildung 36: Versauerungspotenzial für die Behandlung des Bodenbauschuttgemisches.....	100
Abbildung 37: Feinstaubpotenzial (PM 2,5) für die Behandlung des Bodenbauschuttgemisches.....	100
Abbildung 38: Krebsrisikopotenzial für die Behandlung des Bodenbauschuttgemisches.....	101
Abbildung 39: Kumulierter mineralischer Rohstoffaufwand (KRA mineralisch) für die Behandlung des Bodenbauschuttgemisches.....	101
Abbildung 40: Treibhauseffekt für die Behandlung des Gleisschotters	102
Abbildung 41: Fossiler kumulierter Energieaufwand für die Behandlung des Gleisschotters	103
Abbildung 42: Terrestrisches Eutrophierungspotenzial für die Behandlung des Gleisschotters	103
Abbildung 43: Versauerungspotenzial für die Behandlung des Gleisschotters	104
Abbildung 44: Feinstaubpotenzial (PM 2,5) für die Behandlung des Gleisschotters	104
Abbildung 45: Krebsrisikopotenzial für die Behandlung des Gleisschotters.....	105
Abbildung 46: Kumulierter mineralischer Rohstoffaufwand (KRA mineralisch) für die Behandlung des Gleisschotters	105
Abbildung 47: Nettowerte nach Skalierung von 1.000 t auf 125,2 Mio. t auf die jeweiligen pro-Kopf-Lasten in Deutschland normiert in Einwohnerdurchschnittswerten (EDW).....	106

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Auszüge aus den Tabellen 1 bis 3 in Anlage 1 der geplanten EBV in Artikel 1 des Regierungsentwurfes der MantelV (BMUB, 2017) zu den materiellen Anforderungen an mineralische Ersatzbaustoffe (Materialwerte im Eluat und im Feststoff).....	20
Tabelle 2:	Übersicht über die Probenahmen an der Bodenaufbereitungsanlage FEES 25	25
Tabelle 3:	Informationen zur Probenbeschaffung an der Nassklassierungsanlage der Firma Feeß GmbH in Kirchheim unter Teck.....	27
Tabelle 4:	Materialcharakterisierung: Geräte, Hersteller, Probenotyp, Messverfahren.....	28
Tabelle 5:	Analytik - Geräte, Normen, Nachweisgrenzen der untersuchten Analyten.....	31
Tabelle 6:	Gesamtüberblick Untersuchungsmaterialien und Laboruntersuchungsumfang. ..	33
Tabelle 7:	Überblick über Anzahl der Laborversuche und des Analytikumfangs.....	33
Tabelle 8:	Nicht bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Rezyklierte Boden-Bauschuttgemische (RBB I bis V, alle Fraktionen), Gesamtdatensatz für alle Materialchargen und Fraktionen: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in WF 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze. Überschreitungen der GFS durch das 90. Perz. oder/und den Maximalwert fett gedruckt.....	37
Tabelle 9:	Bewertungs- und/oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Rezyklierte Boden-Bauschuttgemische (RBB I bis V, alle Fraktionen), Gesamtdatensatz für alle Materialchargen und Fraktionen: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in WF 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze. Überschreitungen der GFS durch verschiedene statistische Kennwerte sind fett gedruckt. Überschreitungen von Materialwerten der günstigsten Klasse BM-F0* oder RC-1 durch verschiedene statistische Kennwerte sind fett und kursiv gedruckt.....	38
Tabelle 10:	Bewertungsrelevante PAK-Einzelspezies, Rezyklierte Boden-Bauschuttgemische (RBB I bis V, alle Fraktionen), Gesamtdatensatz für alle Materialchargen und Fraktionen: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in WF 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze. Überschreitungen der GFS durch verschiedene statistische Kennwerte sind fett gedruckt.	39
Tabelle 11:	Nicht bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Rezyklierte Boden-Bauschuttgemische (RBB I bis V, alle Fraktionen), Gesamtdatensatz für alle Materialchargen und Fraktionen: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen im Feststoff. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze, ÜW = Überwachungswert nach Tabelle 2.2 EBV. Überschreitungen der Bodenvorsorgewerte (Sand) durch das 90. Perz. oder/und den Maximalwert fett gedruckt.	40
Tabelle 12:	Bewertungs- und/oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Rezyklierte Boden-Bauschuttgemische (RBB I bis V, alle Fraktionen), Gesamtdatensatz für alle Materialchargen und Fraktionen: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen im Feststoff. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze, ÜW = Überwachungswert nach Tabelle 2.2 EBV. Überschreitungen der Bodenvorsorgewerte (Sand) durch das 90. Perz. oder/und den Maximalwert fett gedruckt. Überschreitungen von Materialwerten der günstigsten Klasse BM-F0*	

	oder RC-1 durch verschiedene statistische Kennwerte sind fett und kursiv gedruckt.....	41
Tabelle 13:	Stoffe und Parameter in Waschwässern aus der Nassklassierung Rezyklierte Boden-Bauschuttgemische (RBB I bis V): Statistische Kenngrößen der Konzentrationen. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze. Überschreitungen der GFS sind fett gedruckt.	42
Tabelle 14:	Nicht bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Gleisschottermaterialien (GS I bis II, alle Fraktionen), Gesamtdatensatz für alle Materialchargen und Fraktionen: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in WF 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze. Überschreitungen der GFS durch das 90. Perz. oder/und den Maximalwert fett gedruckt.	45
Tabelle 15:	Bewertungs- und/oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Gleisschottermaterialien (GS I bis V, alle Fraktionen), Gesamtdatensatz für alle Materialchargen und Fraktionen: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in WF 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze. Überschreitungen der GFS durch verschiedene statistische Kennwerte sind fett gedruckt. Überschreitungen von Materialwerten der günstigsten Klasse BM-F0* oder GS-0 durch verschiedene statistische Kennwerte sind fett und kursiv gedruckt.	46
Tabelle 16:	Bewertungsrelevante PAK-Einzelspezies, Gleisschottermaterialien (GS I bis V, alle Fraktionen), Gesamtdatensatz für alle Materialchargen und Fraktionen: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in WF 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze. Überschreitungen der GFS durch verschiedene statistische Kennwerte sind fett gedruckt.	47
Tabelle 17:	Bewertungsrelevante Herbizide-Einzelspezies, Gleisschottermaterialien (GS I bis V, alle Fraktionen), Gesamtdatensatz für alle Materialchargen und Fraktionen: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in WF 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze. Überschreitungen der GS-0-Werte durch verschiedene statistische Kennwerte sind fett gedruckt.	47
Tabelle 18:	Nicht bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Gleisschottermaterialien (GS I bis II alle Fraktionen), Gesamtdatensatz für alle Materialchargen und Fraktionen: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen im Feststoff. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze. Überschreitungen der Bodenvorsorgewerte (Sand) durch das 90. Perz. oder/und den Maximalwert fett gedruckt.	48
Tabelle 19:	Bewertungs- und/oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Gleisschottermaterialien (GS I bis II alle Fraktionen), Gesamtdatensatz für alle Materialchargen und Fraktionen: Statistische Kenngrößen der Feststoffkonzentrationen. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze. Überschreitungen der GFS durch verschiedene statistische Kennwerte sind fett gedruckt. Überschreitungen von Materialwerten der günstigsten Klasse BM-F0* durch verschiedene statistische Kennwerte sind fett und kursiv gedruckt.	49
Tabelle 20:	Stoffe und Parameter in Waschwässern aus der Nassklassierung von Gleisschottermaterialien (GS I bis II): Statistische Kenngrößen der Konzentrationen. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze. Überschreitungen der GFS sind fett gedruckt.	50

Tabelle 21:	Zusammenfassende Übersicht zu den statistisch identifizierten bewertungs- oder regelungsrelevanten Stoffen und Parametern im Feststoff und Eluat aller nassklassierten Fraktionen der hier untersuchten 5 Boden-Bauschuttgemische und 2 Gleisschotter, sowie relevante Konzentrationen	52
Tabelle 22:	Zusammenfassende Übersicht zur Klassifizierung der nassklassierten Materialfraktionen, Klassifizierung, Bestimmung der verwertungslimitierenden Stoffe und Parameter, Ende der Abfalleigenschaft, und zu den Verwertungsmöglichkeiten	62
Tabelle 23:	Chemische Zusammensetzung von Schluff und Sand aus der Aufbereitung von Gleisschotter.....	68
Tabelle 24:	Chemische Zusammensetzung von Schluff und Sand aus der Aufbereitung von Boden-Bauschutt-Gemischen.....	69
Tabelle 25:	Mineralbestand einiger Ziegeltonen und –lehme [25]	85
Tabelle 26:	Bestandteile des feuchten Output- und des nassen Inputstoffstroms	95
Tabelle 27:	Prozessdaten, die durch die Produkte vom Bauschutt-aufbereiter und Wäsche eingespart werden (Nutzen).....	95
Tabelle 28:	Betrachtete Wirkungskategorien	96
Tabelle 29:	Jährliche Pro-Kopf-Lasten und ökologische Bedeutung für die Wirkungskategorien und Indikatoren	96

1. Hintergrund / Aufgabenstellung / Herangehensweise im Projekt

1.1. Hintergrund

Deutschland befindet sich in einer notwendigen Transformation zu einer ressourcenschonenden und auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Kreislaufwirtschaft. Dadurch hat das Thema Ressourceneffizienz in den letzten Jahren einen deutlich höheren Stellenwert erhalten. Zum Schutz der natürlichen Ressourcen wurde das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) verabschiedet, welches eine nachhaltige Rohstoffversorgung sichern sowie Produkte und Konsum ressourcenfreundlicher gestalten soll. Das Programm verfolgt das Ziel, das Wirtschaftswachstum weitgehend vom Ressourceneinsatz zu entkoppeln und die Rohstoffproduktivität bis zum Jahr 2020 (gegenüber 1994) um den Faktor 2 zu steigern.

Die klassischen Rohstoffe werden zunehmend knapp. Die Ursache liegt wesentlich in dem Materialbedarf der Bauwirtschaft und der Baustoffproduktion. Der Bausektor gehört zu den ressourcenintensivsten Wirtschaftssektoren, weshalb in diesem Bereich angesetzt werden muss, um die umweltpolitischen Ziele zu erreichen.

Die Ansatzpunkte für eine Steigerung der Ressourcenproduktivität und Minderung des Rohstoffbedarfs im Baubereich sind zahlreich und vielfältig. In erster Linie soll die Entstehung der Abfälle durch Erhalt und Sanierung der Bausubstanz vermieden werden. Dies kann über eine Verlängerung der Nutzungsdauer oder steigender Flexibilität von Bauwerken gegenüber sich ändernden Nutzungsbedingungen erreicht werden. Nicht vermeidbare Abfälle sollen durch recyclinggerechtes Bauen durch Auswahl von Baumaterialien und Baukonstruktionen mit hoher Selektivität im Rückbau im Wirtschaftskreislauf gehalten werden. Die Beseitigung der Abfälle sollte auf das notwendige Maß beschränkt werden und umweltgerecht erfolgen. Nur so können natürliche Rohstoffe eingespart werden.

Die Ziele des Kreislaufwirtschaftsgesetzes und des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms können daher nur mit einer deutlichen Umstellung in Rückbau und Entsorgung erreicht werden. Für die Herstellung von Bauprodukten wird auf Rohstoffe zurückgegriffen, die bestimmte Spezifikationen aufweisen müssen. Durch Sicherstellung der gewünschten Eigenschaften der Bauprodukte sind keine Umstellungen im Produktionsprozess notwendig – unabhängig davon, ob es sich um primäre Rohstoffe handelt oder aufbereitete Materialien aus der Kreislaufwirtschaft eingesetzt werden. Qualitätssicherungssysteme gewährleisten, dass die Sekundärrohstoffe nach der Aufbereitung hohe Anforderungen erfüllen.

Bisher sind die technischen Möglichkeiten der Aufbereitung von Bauabfällen wirtschaftlich begrenzt, wodurch sich hohe Anforderungen an die Zusammensetzung und Qualität der Inputmassen ergeben. Diese können nur durch die nach Materialien getrennte und störstofffreie Bereitstellung von Abfallmassen ab Baustelle erfüllt werden. Gelingt es, Abbruchgebäude als anthropogenes Rohstofflager und Abbruchmassen als Sekundärrohstoff zu verstehen, kann der Rohstoffkreislauf geschlossen werden. Um mineralische Rohstoffe gleichwertig zu substituieren, sind entsprechende Aufbereitungsschritte notwendig.

Mineralische Bauabfälle sind mit knapp 215 Millionen Tonnen im Jahr die größte Abfallgruppe in Deutschland, bestehend aus unterschiedlichen Abfallarten unterschiedlichster Herkunft. Dazu gehören Bauschutt, Straßenaufbruch, Boden und Steine und Baustellenabfälle. Innerhalb der mineralischen Bauabfälle sind Boden und Boden-Bauschuttgemische mit ca. 125 Mio. Tonnen die mit

Abstand größte Fraktion. Diese stellt jedoch ein großes Entsorgungsproblem dar. Bis dato werden lediglich 9 % dem Materialkreislauf wieder zugeführt. Der überwiegende Anteil (77 %) wird in Rekultivierungsmaßnahmen und Verfüllungen eingesetzt, weitere 14 % über Deponien beseitigt. Beide Wege werden zunehmend schwieriger. Es stehen immer weniger Deponievolumen zur Verfügung, die zudem nur über größere Transportdistanzen erreicht werden können. In Verfüllmaßnahmen werden nur noch möglichst unbelastete Böden akzeptiert. Jedoch weist nur ein geringer Anteil eine Belastung von Z 0 oder Z 0* III A auf, weshalb großer Erweiterungsbedarf bei den vorhandenen Deponien besteht.

Um dies zu vermeiden, eine Steigerung der Ressourceneffizienz zu erreichen und Materialkreisläufe zu schließen, müssen für die Abfallfraktion „Boden und Steine“ Alternativen entwickelt werden. Bisher spielen die Aufbereitung und Verwertung der Bauabfälle eine untergeordnete Rolle. Grund hierfür ist zum einen, dass die bindigen Böden oftmals zu Anhaftungen und Agglomeration führen und in traditionellen Aufbereitungsanlagen nicht verarbeitet werden können. Des Weiteren ist die Zusammensetzung von Steinen und Böden stark schwankend, weshalb die Aufbereitungstechniken und Verwertungswege gezielt darauf abgestimmt werden müssen. Dafür müssen immer wieder Aufbereitungsversuche durchgeführt werden, die mit einem entsprechenden Analyseprogramm gekoppelt sind. Über dieses werden die stoffliche Zusammensetzung, bauphysikalische Eignung und umwelttechnische Analysen durchgeführt. Gelingt es, Böden und Steine wiederaufzubereiten, wäre in erheblichem Umfang eine Schonung knapper primärer Ressourcen erreicht.

Bei der Aufbereitung von Bau- und Abbruchabfällen (selektiver Rückbau, Brechen, Sieben) entstehen Feinmaterialien, wie z. B. Vorsiebmaterial aus einer 22,4 mm-Siebung. Im Feinmaterial reichern sich Schadstoffe an. Vorsieb- und Feinmaterialien werden deshalb zur Ausschleusung von Schadstoffen überwiegend auf Deponien verwertet oder beseitigt (in der Regel Deponieklasse 1 und höher). Im Zuge der Entwicklung der Mantelverordnung (Regierungsentwurf der MantelV des BMUB, 2017¹) und des Planspiels MantelV des BMUB (UBA Texte 104/2017, Bleher et al., 2017) wurden verschiedene Materialproben unter anderem für den Stoffstrom Boden, RC-Baustoffe und Gleisschotter auf Schadstoffbelastungen im Feststoff und im Eluat nach den einzuführenden erstmalig validierten DIN-Normen untersucht. Die geplante MantelV legt verschiedene Materialklassen (definiert durch Materialwerte im Feststoff und Eluat²) für u.a. RC-Baustoffe, Bodenmaterialien und Gleisschotter fest. Mit den Materialklassen sind insgesamt vielfältige und massenmäßig relevante Verwertungsmöglichkeiten bzw. Einbauweisen³ in technischen Bauwerken zu erreichen. Eine

¹ Verordnung der Bundesregierung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung, kurz: MantelV. Die Kabinettsfassung der Mantelverordnung wurde durch die Bundesregierung am 3. Mai 2017 verabschiedet und durch den Bundestag (Bundestagsdrucksache 18/12213 vom 05. Mai 2017) zustimmend an den Bundesrat weitergeleitet. Das EU-Notifizierungsverfahren (EU-Not. 2017-176-D) startete am 05. Mai 2017, die Stillhaltefrist endete am 07. August 2017 ohne Einwände (no contributions unter: <http://ec.europa.eu/growth/tools-databases/tris/en/search/?trisaction=search.detail&year=2017&num=176>). Das Abstimmungsverfahren im Bundesrat (Bundesrats Drucksache 566/17) startete am 07. September 2017. Verschiedene Ausschüsse sprachen sich dafür aus, das Bundesratsabstimmungsverfahren bis zum Antritt einer neuen Bundesregierung zu vertagen, um mehr Zeit für die konstruktive Beratung der komplexen Fachverordnung zu gewinnen.

² „Eluat-Qualität“ eines mineralischen Ersatzbaustoffes, definiert durch die im WF 2-Säulenkurzeluat nach DIN 19528 für die relevanten Substanzen ermittelten Konzentrationen. Diese sogenannten Materialwerte müssen im Rahmen der rechtsverbindlichen Güteüberwachung nach DIN 19528 (z.T. auch gleichwertig DIN 19529 zugelassen) untersucht werden, um die Probe einer bestimmten Materialqualität bzw. Materialklasse zuzuordnen zu können.

³ Potenzieller Verwendungszweck eines mineralischen Ersatzbaustoffes, z.B. Einsatz in Bauwerken mit begrenzter Lebensdauer wie Straßendämme und Bahnkörper, Lärmschutzwälle, Parkplätze, ländliche Wege oder in spezifischen technischen Schichten in technischen Bauwerken wie Schottertragschichten, Frostschutzschichten, Unterbau (Damm).

Möglichkeit stellt hierzu die Nassklassierung dar, wie sie die Firma Feeß GmbH durchführt. Verbesserte Aufbereitungsprozesse können aber zugleich zu weiter steigenden Mengen von Feinmaterial mit noch höherem Schadstoffpotential führen, weil die Schadstoffausschleusung in diese Restfraktion optimiert wird. Bei der Nassklassierung entstehen zudem aufkonzentrierte Waschwässer, deren Schadstoffkonzentrationen kontrolliert und reduziert werden müssen, um eine Rückverteilung von Schadstoffen im Boden-/Steingemisch oder im Gleisschotter bei Kreislaufführung des Wassers in der Anlage zu verhindern. Die Schadstoffentfrachtung des Waschwassers geschieht über Zentrifugations- und Filtrationsanlagen und wird ggf. durch Zusatzmittel (Flockungsmittel) unterstützt. Übrig bleibt eine Schadstoffhaltige Schlufffraktion. Für die Fragen der Dekontamination von Materialfraktionen mittels Nassklassierungsverfahren ist ein fundamentales Verständnis der Stofffreisetzungprozesse von Salzen, Schwermetallen und organischen Schadstoffen notwendig. Hierzu wurden im Rahmen dieses Teilprojekts des ZAG Tübingen von September 2017 bis November 2019 nassklassierte Fraktionen verschiedener Materialchargen aus der Anlage der Firma Feeß GmbH beprobt und umfassenden Laboruntersuchungen unterzogen. Die Messergebnisse wurden nach bestehenden und geplanten Regelwerken ausgewertet, um die Materialfraktionen unter chemischen Gesichtspunkten zu klassifizieren, das Ende der Abfalleigenschaft zu überprüfen und verschiedenen zulässigen Einbauweisen in technischen Bauwerken (Erd-, Straßen-, Wege- oder Schienenverkehrswegebau) zuzuordnen. Dabei können Materialfraktionen identifiziert werden, die aufgrund ihrer hohen Schadstoffpotentiale keiner Materialklasse für die Verwertung in technischen Bauwerken zugeordnet werden können, da die höchsten Materialwerte überschritten sind. Diese Materialien sind vorrangig ordnungsgemäß und schadlos zu verwerten oder gemeinwohlverträglich zu beseitigen.

Die Klassifizierung der nassklassierten Fraktionen unter Umweltgesichtspunkten stellt ein wichtiges Fundament für die Arbeiten der Projektpartner im Projektverbund dar, unter anderem für:

- die markttechnischen Planungen der Firma Feeß GmbH: Wie und für welche Zwecke können die nassklassierten Materialfraktionen in Verkehr gebracht werden?
- die bautechnischen Untersuchungen und Produktentwicklungen des IAB - Institut für Angewandte Bauforschung: Aus welchen Ausgangsmaterialien lassen sich über welche Aufbereitungsschritte hinweg geeignete Produkte herstellen und
- die Stoffstrom- und Marktpotentialanalysen des ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg: Welche grundsätzlichen Möglichkeiten der Verwertung in verschiedenen Sektoren (thermische, nicht thermische ungebundene, gebundene Verfahren: Ziegelherstellung, Zementherstellung, Mineralwolleherstellung, Herstellung von Leichtgranulaten, fließfähiges Verfüllmaterial oder als konditioniertes Schüttgut im Rohrleitungsbau) gibt es in Abhängigkeit von den chemischen und bautechnischen Analyseergebnissen?

1.2. Aufgabenstellung / Herangehensweise im Projekt

Aufgabenstellung

Die Aufbereitung mineralischer Bauabfälle muss auf die neuen Anforderungen ausgerichtet werden. Der Grund hierfür ist die Verlagerung der Bautätigkeit in den Siedlungsbestand. Folglich fallen immer mehr Altmaterialien aus Bauschutt und Straßenbaualtmaterialien als Gemische mit eher bindigen Böden zur Entsorgung an. Der innerörtliche Baugrubenaushub besteht meist aus einer Mischung von historischem Siedlungsschutt und bindigen Böden. Die heutige Bodenwäsche ist lediglich für nichtbindige Böden gut geeignet.

In Zukunft wird jedoch der Anteil problematischer Ausgangsmaterialien aus Siedlungsschutt und Altstraßenschotter weiter zunehmen. Bislang ist die Recyclingwirtschaft hierauf nicht ausgerichtet. 80 % dieser Materialien gelangen in einfache Ablagerungsmaßnahmen oder Deponien, da sich die Materialien mit der heutigen Technik nicht wirtschaftlich aufbereiten lassen. Oftmals sind Schadstoffe von organischen Bodenbestandteilen fest gebunden, sodass die klassische Bodenwäsche die Kontaminanten nicht entfernen kann.

Sollen die im ProgRes formulierten Ziele des Ressourcenschutzes umgesetzt werden, muss eine deutliche Neuausrichtung der Aufbereitungsstrategien und -techniken erfolgen. Eine Lösung hierfür könnte das von CDE entwickelte Verfahren der sogenannten Schwertwäsche darstellen.

Die bereits bekannte Bodenwäsche zielt auf eine Reduzierung der organischen Belastung von Böden ab. Über die Schwertwäsche soll zusätzlich eine gezielte Aufbereitung eines typischen Siedlungsschutts erfolgen und damit Alternativen zur Entsorgung von Boden und Steinen auf Deponien oder Verfüllmaßnahmen aufgezeigt werden. Diese Möglichkeit soll mit dem vorliegenden Forschungsprojekt ausgearbeitet werden.

Bei der Nassklassierungsanlage der Heinrich Feeß GmbH & Co. KG handelt es sich um eine Schwertwäsche mit integrierter Nassklassierung. Diese verspricht Lösungen für die Aufgabenstellung, möglichst hohe Anteile des Abfallmassenstroms in den Materialkreislauf zurückzuführen.

Über die Schwertwäsche ist es möglich, Massenströme wie Gemische aus Bauschutt und Boden in die Teilfraktionen steinig, sandig und lehmig aufzutrennen und damit zu homogenen Teilmassenströmen aufzubereiten. Dies ist die Voraussetzung, um die Materialien als sekundäre Rohstoffe wieder in die Baustoffherstellung zurückführen zu können. Der technische Verfahrenssatz verspricht zusätzlich eine Aufbereitung von eher problematischen Abfallmassen. Durch die Bodenwäsche werden die Materialien gewaschen und von Schadstoffen wie Sulfat oder anderen Störstoffen getrennt.

Mit dem Forschungsprojekt gilt es, Massenströme im Output der Anlage zu produzieren, die möglichst nahe an die Spezifikationen der Baustoffindustrie heranreichen sollten, um dort als Rohstoffe möglichst gleichwertig zu Primärrohstoffen verwendet werden zu können. Dies kann nur durch ein Zusammenspiel aus Anpassung der Aufbereitungstechnik und geeignetem Inputmaterial erreicht werden.

Ein weiteres Ziel besteht in der Schaffung eines konkreten Datensatzes für nach modernen Nassklassierungsverfahren aufbereiteten Materialfraktionen, um gesicherte Aussagen über deren Umweltqualität zu erhalten. Dabei wurden auch die Stoffkonzentrationen von Waschwässern aus der Anlage kontrolliert. Zwischenergebnisse wurden mit dem Betriebsleiter der Anlage ausgetauscht, um Verbesserungsmöglichkeiten im Betriebsablauf und in den technischen Verfahrensschritten der Nassklassierung zu erörtern.

Anhand von Vergleichen der Messergebnisse mit den Grenzwerten der geplanten Novelle der BBodSchV und der EBV wurde eine Klassifizierung von nassklassierten Materialien vorgenommen, um

zulässige Einbauweisen in technischen Bauwerken abzuleiten. Darauf basierend wurden nassklassierte Teilfraktionen identifiziert für die das Ende der Abfalleigenschaften erreichbar sein könnte. Wichtig war auch die Identifizierung von Teilfraktionen, für die aufgrund hoher Stoffgehalte und Freisetzungspotentiale Verwertungsmöglichkeiten außerhalb des Regelungsbereichs der geplanten MantelV oder der einschlägigen Ländererlasse als ungebundenen Gesteinskörnungen im Erd-, Straßen, Wege- und Schienenverkehrswegebau gefunden werden müssen, wie zum Beispiel als Zuschlagsstoffe in gebundenen Materialien mit oder ohne nachfolgender thermischer Aufbereitung.

Zuletzt wurden Aufbaugranulate aus nassklassierten Teilfraktionen des Projektpartners IAB (Institut für Angewandte Bauforschung) wiederrezykliert und im Labor darauf untersucht, ob die wiedergeborenen Materialien erneute Stofffreisetzungspotentiale aufweisen.

Im Rahmen dieses Projektes wurden zwei Masterarbeiten von de Lourdes Prieto Espinoza (2018) und Mast (2020) angefertigt. Hierbei wurden analytische und numerische Modelle zur prozessbasierten Analyse des Stofffreisetzungsverhaltens angewendet, um das Prozessverständnis weiter zu verbessern.

Herangehensweise im Projekt & Aufgabenverteilung

Im Rahmen des Untersuchungsprogramms soll eine Strategie entwickelt werden, die auf Basis der Vielfalt und Heterogenität des Ausgangsmaterials mit häufig problematischen Eigenschaften und Belastungen an Schadstoffen in der Lage ist, hochwertige und in sich homogene Massenströme zu erzeugen.

Dazu müssen in einem schrittweisen Vorgehen immer wieder Aufbereitungsversuche durchgeführt werden, die mit einem entsprechenden Analyseprogramm gekoppelt sind. Dies beinhaltet die stoffliche Zusammensetzung, die bauphysikalische Eignung und umwelttechnische Analysen. Die Ergebnisse werden dann an den Produktspezifikationen für die verschiedensten Absatzwege wie unter anderem Zementindustrie oder Ziegelindustrie gespiegelt. Auf Basis dessen können weitere Aufbereitungsversuche konzipiert werden.

Im ersten Schritt wird die Aufbereitung auf die genannten Verwertungsoptionen Sande, Flüssigboden, und Ziegelindustrie ausgerichtet und entwickelt. Daraufhin erfolgt die Kontaktaufnahme mit Industrieverbänden oder einzelnen Firmen als potentielle Abnehmer der Produkte. Die Kontaktaufnahme erfolgt dabei mithilfe von Materialproben und den Ergebnissen des Analyseprogramms.

Im Ergebnis ist so eine Rückmeldung aus der Praxis in die Strategie- und Verfahrensentwicklung zu erhalten. Durch die Rückkopplung werden Produkteigenschaften angepasst und Aufbereitungsziele feinjustiert. Gegebenenfalls muss die Verfahrenstechnik modifiziert sowie die Auswahl und Vorbehandlung der Ausgangsmaterialien angepasst werden.

Bei der Aufbereitung von Böden und Boden-Bauschuttgemischen in der Nassklassierungsanlage entstehen verschiedene Körnungen und ein Schlamm mit einem Wassergehalt von ca. 25 %. Für die Körnungen sind die möglichen Verwertungswege bereits bekannt. Diese eignen sich beispielsweise als Zuschlag für die Betonherstellung oder für die Herstellung von Pflastersplitt. Um Verwertungsmöglichkeiten für Schlamm, Sande und Schluff zu finden, sind zunächst Untersuchungen zur chemischen und mineralogischen Zusammensetzung und zu physikalischen Parametern wie Partikelgrößenverteilung und Wassergehalt erforderlich. Dafür werden mehrere Proben entnommen und analysiert. Anhand deren Ergebnissen werden grundsätzliche Möglichkeiten der Verwertung in folgenden Sektoren geprüft: Einsatz in thermischen Verfahren (Ziegelherstellung, Zementherstellung) und Einsatz als fließfähiges Verfüllmaterial.

Grundsätzlich müssen sich die Absatzwege an den wertgebenden Eigenschaften orientieren und diese möglichst umfassend nutzen. Die Verwertung muss in Marktsegmente hinein erfolgen, die hohe Substitutionserfolge und damit Einsparungen von primären Rohstoffen ermöglichen. Die Baubranche wird auf die typischerweise verwendeten Bauprodukte hin analysiert und die in den jeweiligen Einsatzbereichen benötigten Produkteigenschaften recherchiert. Auf der Bewertung der grundsätzlichen Einsatzmöglichkeiten wird dann geprüft, welche Firmen vom Standort her in Frage kommen.

Es werden folgende Untersuchungen unter Verwertung eines Schlammes durchgeführt:

- Zusatz von Schlamm bei der Ziegelherstellung in ausgewählter Firma
- Zusatz von Schlamm bei der Zementherstellung am ausgewählten Standort

Aufgabenverteilung zwischen den Kooperationspartnern:

Heinrich Feeß GmbH & Co. KG:

Die Anlage zur nassen Aufbereitung mineralischer Bauabfälle wird von Feess zur Verfügung gestellt. Zuerst soll eine zusammenfassende Darstellung der bisherigen Anpassungen im Betrieb der Nassklassierungsanlage erfolgen. Zudem sollen die bisherigen Ergebnisse zur Reproduzierbarkeit des Verfahrens und der Aufbereitungserfolge in Abhängigkeit unterschiedlicher Abfallzusammensetzungen im Input dargelegt werden. Gemeinsam mit dem IAB soll dann eine praxisgerechte Aufbereitungsstrategie entwickelt werden, die eine vollständige und hochwertige Verwertung von Boden- und Bauschuttmaterial sicherstellen soll.

IAB Institut für angewandte Bauforschung Weimar gGmbH:

Das IAB ist für die wissenschaftliche Begleitforschung zur Entwicklung der Aufbereitungsstrategie und die Charakterisierung der verschiedenen Korngemische und des Schlammes auf Zusammensetzung und bauphysikalische Eigenschaften verantwortlich. Des Weiteren sollen Verwertungsstrategien in Richtung Ziegel-, Mörtel- und Zementindustrie sowie Flüssigboden entwickelt werden. In Zusammenarbeit mit dem IFEU-Institut werden die Vermarktungswege für die sandige und schluffige Feinfraktion erarbeitet, indem ein intensiver Austausch mit den entsprechenden Verbänden und Firmen gesucht wird.

IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH:

Die Aufgaben des IFEU-Instituts liegen neben der wissenschaftlichen Projektleitung in der ökologischen Begleitforschung sowie in der Entwicklung einer optimierten Verwertungsstrategie. Für die unterschiedlichen denkbaren Absatzwege wurde der Kontakt zur Baustoffindustrie gesucht, um diese über die Möglichkeiten der Verwendung von Rohstoffen aus dem Materialkreislauf zu informieren, dafür zu werben und die jeweiligen Spezifikationen zu ermitteln. Diese Informationen konnten dann an die Projektpartner zurückgespiegelt und zur Anpassung der Anlagentechnik oder Aufbereitungsstrategie genutzt werden.

Zentrum für Angewandte Geowissenschaften (ZAG):

Im Rahmen dieses Teilvorhabens werden für verschiedene Materialtypen und Chargen des gleichen Materialtyps Ausgangsmaterialien (Inputmaterial), die Schlufffraktionen und verschiedene nassklassierte Teilfraktionen (Sande und Splitte) aus einer modernen Nassklassierungsanlage der Firma Feeß in Kirchheim unter Teck gewonnen und verschiedenen Laboruntersuchungen unterzogen:

Feldarbeiten

- Beprobung jeweils der Inputmaterialien, der Schlufffraktionen und weiterer nassklassierter Fraktionen (Sande und Splitte) von 2 Gleisschottermaterialien (GS I und GS II) und 5 Boden-Bauschutt-Gemischen (RBB I bis V) an der Nassklassierungsanlage der Firma Feeß in Kirchheim unter Teck.
- Jeweils Beprobung des Waschwassers.
- Verteilung von Aliquoten an die Kooperationspartner IAB, Firma Feeß GmbH und an das ifeu-Institut für Energie- und Umwelt.

Laborarbeiten

- Durchführung von Feststoffextraktionen mit allen nassklassierten Fraktionen und Analyse auf ein breites Stoffspektrum anorganischer und organischer Stoffe und Parameter.
- Durchführung von WF 2-Säulenkurztests nach DIN 19528 (2009) mit nassklassierten Fraktionen und einem Aufbaugranulat (Intakt versus wiederrecykliert) und Analyse auf ein breites Stoffspektrum anorganischer und organischer Stoffe und Parameter.
- Durchführung von ausführlichen Säulenversuchen nach DIN 19528 (2009) mit nassklassierten Fraktionen von zwei ausgewählten Boden-Bauschutt-Gemischen (RBB III und RBB V) und Analyse auf ein breites Stoffspektrum anorganischer und organischer Stoffe und Parameter.

Auswertungen

- Identifizierung bewertungsrelevanter Stoffe und Parameter nach UBA-Fachkonzept (Susset et al., 2018, UBA Texte 26/ 2018).
- Bewertung der gefundenen Stoffkonzentrationen nach geplanter Mantelverordnung des BMUB (Regierungsentwurf der MantelV, BMUB 2017):
 - Zuordnung der nassklassierten Fraktionen zu Materialklassen nach geplanter EBV
 - Überprüfung Ende der Abfalleigenschaft und damit verbundenen zulässigen Einbauweisen nach geplanter MantelV des BMUB
 - Identifizierung von Teilfraktionen, die nicht als ungebundenes Material eingesetzt werden könnten.
- Untersuchung und Bewertung des Stofffreisetzungspotentials eines wiederrecyklierten Aufbaugranulates des IAB.

Prozessbasierte Analyse Forschungsfragen

- Einfluss des Waschprozesses auf die Stoffkonzentrationen im Feststoff und Eluat
- Analytische und numerische Modellierung der Stofffreisetzung und des reaktiven Transportes zum erweiterten Prozessverständnis.

1.3. Inhaltliche Änderung / Laufzeitverlängerung

Es waren keine inhaltlichen Änderungen erforderlich. Jedoch ergab sich die Notwendigkeit einer kostenneutralen Laufzeitverlängerung von 6 Monaten.

2. Kurze Beschreibung

2.1 Ausgangssituation im Projekt – Anlagentechnik

Die Bodenaufbereitungsanlage dient im Wesentlichen der mechanischen Trennung mineralischer Stoffe in unterschiedliche Kornklassen unter Zuhilfenahme von Wasser. Die Anlage besteht aus der Vorsiebeinheit, mehreren Nasssieben, der Schwertwäsche sowie der Sand- und Wasseraufbereitung.

Die Nassklassierungsanlage wird mithilfe eines Radladers über eine Abwurfkante beschickt. Durch ein 2-Deck-Finger-Sieb wird das zu behandelnde Material direkt in zwei Fraktionen aufgetrennt. Die grobe Fraktion > 115 mm wird separiert und der Anlage nicht zugeführt. Die Fraktion < 115 mm wird mittels Förderband der nachgeschalteten Nasssiebung zugeführt.

In der Nassklassierungsstufe 1 wird das gesiebte Material gewaschen und in einem 2-Deck Finger-Sieb in verschiedene Fraktionen (0/2, 2/32, 32/115) getrennt. Das Material 32/115 wird in eine Box transportiert. Die Fraktion 2/32 wird mittels Förderband der Nassklassierungsstufe 2 zugeführt. Das Material 0/2 wird der Sandaufbereitung zugeführt.

In der Nassklassierungsstufe 2 wird das Material 2/32 mittels Förderband am unteren Ende in die Schwertwäsche eingebracht. Die Schwertwäsche ist die zentrale Komponente der Anlage. In ihr wird das Material innerhalb eines Wasserbads durch Attrition gereinigt.

In einem schräg gestellten Trog wird das Material von zwei gegenläufigen Wellen mit sog. „Schwertern“ erfasst und durch die Drehbewegung an das obere Ende transportiert. Die Attrition löst Konglomerat und Anhaftungen von bindigen Rückständen auf dem Gestein. Unter dem oberen Auslauf der Schwertwäsche befindet sich eine Siebmaschine, welche die Materialmischung 0/32 in die Kornfraktionen 0/2, 2/8, 8/16 und 16/32 trennt.

Ein Teil des Schmutzwassers und der Leichtstoffe wie beispielsweise Holz werden der Anlage ausgetragen und einem Entwässerungssieb zugeführt. Dort findet eine Trennung des Gemischs statt und die Leichtstoffe werden abtransportiert. Der Siebunterlauf von Siebmaschine (0/2) und Entwässerungssieb wird in der Sandaufbereitung weiter behandelt, dort erfolgt die Abtrennung des Schluffs in zwei Hydrozyklonen. Der ursprüngliche Single Pass wurde bereits vor Beginn des Projekts auf eine Dual-Pass Zyklonanlage umgebaut. Grund hierfür war eine verfahrenstechnische Änderung der Sandaufbereitung, da das vorhandene Aufgabematerial zu viele Anteile < 63 mic enthält und der Wirkungsgrad eines Zyklons (ca. 80 %) für die Vermarktung des Sandes nicht ausreichte. Durch zweimaliges Waschen enthält der Sand i.d.R. weniger als 5 % Schluffanteile.

In der Aufbereitungsstufe wird das schluffhaltige Prozesswasser durch die Wasseraufbereitung gereinigt. Schmutzwasser und ein verdünntes Flockungsmittel werden einem Konzentrator zugeführt. Das feststoffarme Oberflächenwasser des Konzentrators wird in den Wassertank überführt, der eingedickte Schlamm aus den vier Trichterböden mittels Pumpen in einen Pufferspeicher überführt. Der eingedickte Schlamm wird vom Pufferspeicher zur Zentrifuge gepumpt. Hier werden Wasser und Feststoffpartikel mithilfe eines Flockungsmittels und starker Zentrifugalkraft nahezu vollständig voneinander getrennt. Das feststofffreie Wasser wird teilweise mit einem Entschäumungsmittel versetzt und in den Prozess zurückgeführt. Der Schlamm wird mit einem verringerten Wassergehalt ausgetragen und bis zur fachgerechten Entsorgung zwischengelagert.

Umbaumaßnahmen im Rahmen des Projektes

Das Material 32/115, welches in der 1. Nassaufbereitungsstufe anfällt, ist nicht verkaufsfähig und muss deshalb gebrochen werden. Bisher wurde das Material in verschiedenen Boxen gelagert, bis die Brecheranlage zur Verfügung stand, das Material gebrochen und in weitere Boxen transportiert wurde.

Um unter anderem den vielen Radlader-Verkehr wegen des Transports zu vermeiden und weniger Boxen zur Zwischenlagerung des Materials zu belegen, wurde eine Nachbrecheranlage mit Lesestation eingebaut.

Das Material 32/115 wird nicht mehr in Lagerboxen transportiert, sondern läuft über drei Steilförderbänder direkt in den integrierten Nachbrecher. Mit dieser Maßnahme wird das unerwünschte Überkornmaterial zu Splitt und Sand gebrochen. Es kann somit auf Marktänderungen reagiert werden.

Durch die Siebbelegung in der ersten Siebmaschine wird entschieden, welche Kornfraktion dem Brecher zugeführt werden. Durch diese Maßnahme und der Vielzahl an Korngrößen ist es möglich, den Kundenwünschen besser entgegenzukommen. Angedacht ist auch die Aufbereitung von Gleisschotter und die mögliche Vermarktung in Richtung Asphaltindustrie.

Die Lesestation gewährleistet zusätzlich eine bessere Qualität des Output-Materials. Früher wurden die Störstoffe am Haufwerk ausgelesen, gesammelt und im Restmüll entsorgt. Durch den Umbau werden die Fremdstoffe in mehrere Behälter für Holz, Metall, Plastik, etc. sortiert und können getrennt verwertet und entsorgt werden. Beispielsweise geht das Holz in die vorhandene Heizungsanlage, wodurch die Menge an Restmüll reduziert wird. Zudem wird die Mitarbeitermotivation durch die überdachte und beheizte Lesestation aufrechterhalten, wodurch eine bessere Qualität gewährleistet werden kann.

Eine Umbaumaßnahme im Rahmen des Projektes ist die Nachsiebanlage. Bisher entstanden nach der Schwertwäsche die Körnungen 0/2, 2/8, 8/16 und 16/32. Der Materialfluss wurde angepasst. Die Änderungen umfassten eine Änderung der Maschenweite in der vorhandenen Siebmaschine für die Körnungen 0/2, 2/5, 5/8 und 8/32 sowie einer zusätzlichen Siebmaschine für die trockene Trennung der Körnungen 8/11, 11/16 und 16/32.

Durch den Umbau kann demnach eine größere Anzahl an Korngruppen hergestellt und vermarktet werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, über eine Materialweiche die Körnung 8/32 ohne die Verwendung der zusätzlichen Siebmaschine zu produzieren.

2.2 Rechtliche und fachliche Grundlagen

Nachfolgend werden die allgemeinen und speziellen materiellen Anforderungen an das Ende der Abfalleigenschaften von hier untersuchten nassklassierten Fraktionen im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes und der geplanten Mantelverordnung untersucht. Nach Nr. 4 des § 5 Abs. 1 KrWG gilt, dass die Verwendung von Abfällen nicht zu schädlichen Auswirkungen für Mensch und Umwelt führen darf. Um dies zu beurteilen, werden in der geplanten Mantelverordnung konkrete materielle Anforderungen geregelt: Die materiellen Anforderungen an Bodenmaterial und Baggergut nach LAGA TR Boden 2004, VwV Boden 2007 und Novelle BBodSchV (Artikel 2 der Kabinettsfassung der MantelV, 2017) werden in Susset et al. (2017, UM-Bericht Baden-Württemberg zu Bodenuntersuchungen) verglichen und eingehend beschrieben. Das Fachkonzept zur Ableitung von Grenzwerten für Bodenmaterial im Rahmen der Novelle BBodSchV wird in Kapitel 2.1 des UM-Berichtes nach Susset et al., 2017 eingehend beschrieben. Das Fachkonzept zur Identifizierung bewertungs- und regelungsrelevanter Konzentrationen und das Grenzwertableitungskonzept für RC-Baustoffe und Gleisschotter finden sich im UBA-Text 26/2018 (Susset et al., 2018). Detaillierte Informationen zur Funktion und Eignung von Laborelutionsverfahren für verschiedene Fragestellungen und deren Anwendung in gesetzlichen Regelungen finden sich im UBA Text 112/2017 Susset et al., (2017). Die hier gefundenen Stoffkonzentrationen im Feststoff und in Eluat werden mit den jeweils

einschlägigen Grenzwerten im jeweiligen Ergebniskapitel verglichen. Darüber hinaus wird nach den im Folgenden beschriebenen rechtlichen Kriterien das Ende der Abfalleigenschaften überprüft.

Überprüfung allgemeiner Anforderungen an das Ende der Abfalleigenschaft nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz

Voraussetzungen des § 5 Abs. 1 Kreislaufwirtschaftsgesetz Nr. 1 bis 3 (KrwG, BMU, 2012)

§ 5 Ende der Abfalleigenschaft

(1) Die Abfalleigenschaft eines Stoffes oder Gegenstandes endet, wenn dieser ein Verwertungsverfahren durchlaufen hat und so beschaffen ist, dass

1. er üblicherweise für bestimmte Zwecke verwendet wird,
2. ein Markt für ihn oder eine Nachfrage nach ihm besteht,
3. er alle für seine jeweilige Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen sowie alle Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen für Erzeugnisse erfüllt sowie

Zu §5 (1), 1. Die nassklassierten Sande 0/2 werden in der Regel als Betonzuschlagsstoff zum Zweck der Betonherstellung, also üblicherweise für einen bestimmten Zweck verwendet. Splitte 2/8, 8/16 und 16/32 können ebenfalls als Betonzuschlagsstoff oder als ungebunden Gemische für Frostschutz- und Schottertragschichten eingesetzt, also ebenfalls im Sinne des KrwG für einen bestimmten Zweck verwendet werden (z.B. im geregelten Straßenbau nach den Technischen Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau, TL SoB-StB 04, Fassung 2007, FGSV, 2007). Letzteres gilt auch für Sande 0/2 die beispielsweise als Kabelsande in Leitungsgräben verbaut und damit für einen bestimmten Zweck eingesetzt werden.

Zu §5, (1), 2. Es herrschen ein Markt und eine Nachfrage von Betonherstellern nach nassklassierten Sanden 0/2 und Splitten vor. Ebenso von Baufirmen nach Sand- und Splittfraktionen für den Erd-, Straßen- und Wegebau. Die nassklassierten Fraktionen werden mit einem positiven Marktwert an Betonwerke oder Baufirmen verkauft.

§5, (1), 3. Nassklassierte Sande 0/2 und Splitte müssen durch eine RAP-Stra-Untersuchungsstelle je nach Verwendungszweck nach Betonnormen und Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton oder nach Straßenregelwerken für ungebundene Gemische untersucht werden. Erfahrungsgemäß erfüllen nassklassierte Sande 0/2 und Splitte, die für seine Zweckbestimmung als Betonzuschlagstoff oder als ungebundene Gemische geltenden technischen Anforderungen und Normen für Erzeugnisse (vgl. gesonderte RAP-Stra-Gutachten).

Überprüfung der Anforderungen nach § 20, EBV nach dem Ende der Abfalleigenschaft zur Konkretisierung der Nr. 4 des § 5 Abs. 1 KrWG

Schädliche Auswirkungen auf Mensch oder Umwelt

Nach Nr. 4 des § 5 Abs. 1 KrWG gilt:

4. seine Verwendung insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch oder Umwelt führt.

(2) Die Bundesregierung wird ermächtigt, nach Anhörung der beteiligten Kreise (§ 68) durch Rechtsverordnung mit Zustimmung des Bundesrates nach Maßgabe der in Absatz 1 genannten Anforderungen die Bedingungen näher zu bestimmen, unter denen für bestimmte Stoffe und Gegenstände die Abfalleigenschaft endet, und Anforderungen zum Schutz von Mensch und Umwelt, insbesondere durch Grenzwerte für Schadstoffe, festzulegen.

Die relevanten Regelungen der EBV (BMUB, 2017) zum Ende der Abfalleigenschaften von Bodenmaterialien, Recycling-Baustoffen und Gleisschottermaterial lauten (kursiv):

§ 2 Begriffsbestimmungen

Für diese Verordnung gelten folgende Begriffsbestimmungen:

31. Recycling-Baustoff:

mineralischer Baustoff, der durch die Aufbereitung von mineralischen Abfällen hergestellt wird, die

a) bei Baumaßnahmen wie Rückbau, Abriss, Umbau, Ausbau, Neubau und Erhaltung angefallen sind oder

b) bei der Herstellung mineralischer Bauprodukte angefallen sind,

33. Gleisschotter:

Bettungsmaterial aus Naturstein, das bei Baumaßnahmen an Schienenverkehrswegen oberhalb der Tragschicht oder des Planums anfällt oder in einer Aufbereitungsanlage behandelt wurde,

35. Bodenmaterial (BM):

Material aus dem Oberboden, dem Unterboden oder dem Untergrund, das ausgehoben, abgeschoben, abgetragen oder in einer Aufbereitungsanlage behandelt wird oder wurde.

Bei den hier untersuchten nassklassierten Fraktionen aus Bauschutt-Boden-Gemischen (RBB) handelt es sich entweder um aufbereitetes Bodenmaterial (BM) im Sinne §2, Nummer 35 der geplanten EBV oder um Recycling-Baustoffe (RC) im Sinne §2, Nummer 31 der geplanten EBV. Diese Zuordnung kann hier nicht abschließend geklärt werden. Für die Bewertung der Umweltqualitäten werden deshalb die Materialwerte sowohl für Bodenmaterial als auch für RC-Baustoffe herangezogen.

Bei den hier untersuchten nassklassierten Fraktionen aus Gleisschottermaterialien (GS) handelt es sich entweder um aufbereitetes Bodenmaterial (BM) im Sinne §2, Nummer 35 der geplanten EBV oder um aufbereiteten, behandelten Gleisschotter (GS) im Sinne §2, Nummer 33 der geplanten EBV. Auch diese Zuordnung kann hier nicht abschließend geklärt werden. Für die Bewertung der Umweltqualitäten werden deshalb die Materialwerte sowohl für Bodenmaterial als auch für Gleisschotter herangezogen.

§ 20 Ende der Abfalleigenschaft

Für folgende mineralische Ersatzbaustoffe endet vorbehaltlich der Erfüllung der weiteren Voraussetzungen des § 5 Absatz 1 Nummer 1 bis 3 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes die Abfalleigenschaft:

- 1. Recycling-Baustoff der Klasse 1 - RC-1 -,*
- 2. Bodenmaterial der Klasse 0 - BM-0 -,*
- 3. Bodenmaterial der Klasse 0* - BM-0* -,*
- 4. Bodenmaterial der Klasse FO* - BM-FO* -,*
- 5. Bodenmaterial der Klasse F1 - BM-F1 -,*

10. Gleisschotter der Klasse 0 - GS-0 - und

11. Gleisschotter der Klasse 1 - GS-1 -.

Andere mineralische Ersatzbaustoffe im Sinne des § 2 Nummer 1 dürfen nicht als mineralische Ersatzbaustoffe, die das Ende der Abfalleigenschaft erreicht haben, in Verkehr gebracht werden.

Die durch die Nassklassierung aufbereiteten Fraktionen aus den Boden-Bauschuttgemischen (RBB) werden entweder als Bodenmaterialien (BM) oder als Recyclingbaustoffe (RC) im Sinne der EBV

eingestuft und erfüllen die konkretisierten Anforderungen nach EBV zu Nr. 4 des § 5 Abs. 1 KrWG für Bodenmaterialien und RC-Baustoffe, wenn Sie gemäß § 20 EBV folgende Materialklassen von Bodenmaterialien und RC-Baustoffen einhalten:

Bodenmaterial der Klasse 0 - BM-0 oder

Bodenmaterial der Klasse 0* - BM-0* oder

Bodenmaterial der Klasse F0* - BM-F0* oder

Bodenmaterial der Klasse F1 - BM-F1 und

Recycling-Baustoffe der Klasse 1- RC-1.

Die durch die Nassklassierung aufbereiteten Fraktionen aus den Gleisschottermaterialien werden entweder als Bodenmaterialien (BM) oder als Gleisschotter (GS) im Sinne der EBV eingestuft und erfüllen die konkretisierten Anforderungen nach EBV zu Nr. 4 des § 5 Abs. 1 KrWG für Bodenmaterialien und Gleisschotter, wenn Sie gemäß § 20 EBV folgende Materialklassen von Bodenmaterialien und Gleisschotter einhalten:

Bodenmaterial der Klasse 0 - BM-0 oder

Bodenmaterial der Klasse 0* - BM-0* oder

Bodenmaterial der Klasse F0* - BM-F0* oder

Bodenmaterial der Klasse F1 - BM-F1 und

Gleisschotter der Klasse 0 - GS-0 - oder

Gleisschotter der Klasse 1 - GS-1.

Tabelle 1 zeigt die einstufigsrelevanten Materialwerte aus dem Regierungsentwurf der Mantelverordnung des BMUB (2017), nach welchen die zu untersuchenden Materialien in Materialklassen klassifiziert werden. Diese Materialklassen sind mit bestimmten in der geplanten EBV geregelten zulässigen Einbauweisen in technischen Bauwerken des Erd-, Straßen-, Wege- und Schienenverkehrswegebau verbunden. Damit konkretisiert die EBV die Anforderungen nach Nr. 4 des § 5 Abs. 1 KrWG, so dass die "Verwendung insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt führt".

Tabelle 1: Auszüge aus den Tabellen 1 bis 3 in Anlage 1 der geplanten EBV in Artikel 1 des Regierungsentwurfes der MantelV (BMUB, 2017) zu den materiellen Anforderungen an mineralische Ersatzbaustoffe (Materialwerte im Eluat und im Feststoff)

Tabelle 3 Materialwerte für Bodenmaterial¹ und Baggergut

Parameter	Dim.	BM-0 BG-0 Sand ² ,	BM-0 BG-0 Lehm/Schluff ²	BM-0 BG-0 Ton ²	BM-0* BG-0* ³	BM-F0* BG-F0*	BM-F1 BG-F1
Mineralische Fremdbestandteile	Vol.-%	bis 10	bis 10	bis 10	bis 10	bis 50	bis 50
pH-Wert ⁴						6,5–9,5	6,5–9,5
elektr. Leitfähigkeit ⁴	µS/cm					350	500
Sulfat	mg/l				250 ⁵	250	450
Arsen	mg/kg	10	20	20	20	40	40
Arsen	µg/l				10 (13)		
Blei	mg/kg	40	70	100	140	140	140
Blei	µg/l				23 (43)	35	90
Cadmium	mg/kg	0,4	1	1,5	1 ⁶	2	2
Cadmium	µg/l				2 (4)		
Chrom, gesamt	mg/kg	30	60	100	120	120	120
Chrom, gesamt	µg/l				10 (19)	15	150
Kupfer	mg/kg	20	40	60	80	80	80
Kupfer	µg/l				20 (41)	30	110
Nickel	mg/kg	15	50	70	100	100	100
Nickel	µg/l				20 (31)	30	30
Quecksilber	mg/kg	0,2	0,3	0,3	0,6	0,6	0,6
Quecksilber	µg/l				0,1		
Thallium	mg/kg	0,5	1,0	1,0	1,0	2	2
Thallium	µg/l				0,8		
Zink	mg/kg	60	150	200	300	300	300
Zink	µg/l				100 (210)	150	160
TOC	M%	?	?	?	?	5	5
Kohlenwasserstoffe ³	mg/kg					300(600)	300(600)
Benzo(a)pyren	mg/kg	0,3	0,3	0,3			
PAK ₁₅ ⁷	mg/kg	3	3	3	6	6	6
PAK ₁₅ ¹⁰	µg/l				0,2	0,3	2,3
Naphthalin und Methylnaphthaline, gesamt	µg/l				2		
PCB ₈ und PCB-118	mg/kg	0,05	0,05	0,05	0,1		
PCB ₈ und PCB-118	µg/l				0,01		
EOX ¹¹	mg/kg	1	1	1	1		

Fortsetzung Tabelle 1

MEB		RC-1	RC-2	RC-3
Parameter	Dim.			
pH-Wert ¹		6-13	6-13	6-13
el. Leitf. ²	µS/cm	2 500	3 200	10 000
Chlorid	mg/l			
Sulfat	mg/l	600	1 000	3 500
Fluorid	mg/l			
DOC	mg/l			
PAK ₁₅	µg/l	6,0	12	25
PAK ₁₆	mg/kg	10	15	20
Antimon	µg/l			
Arsen	µg/l			
Blei	µg/l			
Cadmium	µg/l			
Chrom, ges.	µg/l	150	440	900
Kupfer	µg/l	110	250	500
Molybdän	µg/l			
Nickel	µg/l			
Vanadium	µg/l	120	700	1 350
Zink	µg/l			

¹nur bei GRS Grenzwert, ansonsten stoffspezifischer Orientierungswert, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen
²stoffspezifischer Orientierungswert, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen

Tabelle 2

Materialwerte für Gleisschotter

Parameter	Dimension	GS-0	GS-1	GS-2	GS-3
pH ¹		6,5–10	6,5–10	6,5–10	5–12
elektr. Leitfähigkeit ¹	µS/cm	500	500	500	1 000
Atrazin	µg/l	0,2	0,7	3,5	14
Bromacil	µg/l	0,2	0,4	1,2	5,3
Diuron	µg/l	0,1	0,2	0,8	4,6
Glyphosat	µg/l	0,2	1,7	17	27
AMPA	µg/l	2,5	4,5	17	50
Simazin	µg/l	0,2	1,5	12	27
sonst. Herbizide ²	µg/l	0,2	2,1	17	27
MKW	µg/l	150	160	310	500
PAK ₁₅	µg/l	0,3	2,3	42	50

¹stoffspezifischer Orientierungswert, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen

²Einzelwerte jeweils für Dimeturon, Flazasulfuron, Flumioxazin, Ethidimuron, Thiazafuron sowie für neu zugelassene Wirkstoffe

Teilprojekt des ZAG Tübingen: Rechtliche und fachliche Grundlagen

Im Rahmen dieses Teilprojektes werden die allgemeinen und speziellen materiellen Anforderungen an das Ende der Abfalleigenschaften von hier untersuchten nassklassierten Fraktionen im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes und der geplanten Mantelverordnung untersucht.

Die allgemeinen Voraussetzungen des § 5 Abs. 1 Kreislaufwirtschaftsgesetz Nr. 1 bis 3 (KrwG, BMU, 2012) für das Ende der Abfalleigenschaft der nassklassierten Fraktionen sind demnach vorrausichtlich erfüllt, da

(1) das Nassklassierungsverfahren ein geeignetes Verwertungsverfahren darstellt und jede nassklassierte Fraktion in Abhängigkeit seiner Körnung und bauphysikalischen Eignung üblicherweise für einen bestimmten Zweck verwendet wird (z.B. Betonzuschlagsstoffe, ungebundene Gemische für Infrastrukturbau),

(2) ein Markt und eine Nachfrage nach nassklassierten Sanden und Splitten besteht (z.B. Baufirmen, Betonwerke) und

(3) eine nassklassierte Fraktion alle für seine Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen und Normen einhalten muss (z.B. Untersuchungen einer RAP-Strah-Untersuchungsstelle je nach Verwendungszweck nach Betonnormen und Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton oder nach Straßenregelwerken für ungebundene Gemische).

Nach Nr. 4 des § 5 Abs. 1 KrwG werden spezielle Voraussetzungen im Rahmen der Forderung, dass das Material insgesamt keine **schädlichen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt** aufweisen darf, untersucht. Grundlage hierfür sind die **relevanten Regelungen der EBV (BMUB, 2017) zum Ende der Abfalleigenschaften von Bodenmaterialien, Recycling-Baustoffen und Gleisschottermaterial, zur Güteüberwachung, Materialwerten und Klassifizierung.**

Bei den hier untersuchten nassklassierten Fraktionen aus **Bauschutt-Boden-Gemischen (RBB)** handelt es sich entweder um aufbereitetes Bodenmaterial (BM) im Sinne §2, Nummer 35 der geplanten EBV oder um Recycling-Baustoffe (RC) im Sinne §2, Nummer 31 der geplanten EBV. Diese Zuordnung kann hier nicht abschließend geklärt werden. Für die Bewertung der Umweltqualitäten werden deshalb die Materialwerte sowohl für Bodenmaterial als auch für RC-Baustoffe herangezogen.

Bei den hier untersuchten nassklassierten Fraktionen aus **Gleisschottermaterialien (GS)** handelt es sich entweder um aufbereitetes Bodenmaterial (BM) im Sinne §2, Nummer 35 der geplanten EBV oder um auf-bereiteten, behandelten Gleisschotter (GS) im Sinne §2, Nummer 33 der geplanten EBV. Auch diese Zuordnung kann hier nicht abschließend geklärt werden. Für die Bewertung der Umweltqualitäten werden deshalb die Materialwerte sowohl für Bodenmaterial als auch für Gleisschotter herangezogen.

2.3 Material und Methoden

Folgende Materialien eignen sich für eine Aufbereitung:

- Gleisschotter GS ohne Belastungen, maximal bis zur Zuordnungsklasse Z 1.2
- Gleisschotter GS mit Mikroplastik bis zur Zuordnungsklasse Z 2
- Reiner Bodenaushub als Kalk-Mergel mit geringen Ton-Anteilen und großen Kalksteinbrocken
- Diverse Boden-Bauschutt-Gemische

Der Bodenaushub und die Boden-Bauschutt-Gemische werden vor der Aufgabe untereinander vermischt. Dies erfolgt mittels Radlader in der Box, in der das Material gelagert wird, und unterliegt subjektiven Einflüssen wie der Verfügbarkeit der Materialien oder der Erfahrung des Radlader-Fahrers. Dadurch soll eine Vergleichmäßigung des Aufgabematerials erreicht werden.

Um die Produkte aus der Nassklassierungsanlage möglichst repräsentativ zu charakterisieren, wurden mehrere Probenahmen vereinbart. Bei dem vergleichsweise homogenen Aufgabematerial Gleisschotter fanden 2 Probenahmen statt. Für den Bodenaushub bzw. die Boden-Bauschutt-Gemische wurden 5 Probenahmen durchgeführt.



Abbildung 1: Aufgabematerial Gleisschotter



Abbildung 2: Gleisschotter mit Mikroplastik



Abbildung 3: Bodenaushub aus Kalk-Mergel



Abbildung 4: Boden-Bauschutt-Gemisch

Am 15.04.2019 wurden zusätzlich 3 Proben übergeben. An diesen Proben, die über den vereinbarten Probenrahmen hinausgingen, wurden zunächst chemische Untersuchungen vorgenommen. Weitere Untersuchungen wurden nicht durchgeführt.

Die Proben wurden ausführlich charakterisiert. Zunächst erfolgte die Feuchtebestimmung. An den getrockneten Proben wurden folgende physikalische Eigenschaften bestimmt:

- Partikelgrößenverteilung,
- Partikelform,
- Rein-, Roh- und Schüttdichte.

Die Partikelgrößenverteilungen für die Schluffe wurden mittels Laserbeugungsanalyse mit dem Gerät Beckman Coulter LS 13320 gemessen. Für die Sande und Splitte kam der Resch Camsizer P4 zum Einsatz, bei dem die Partikelgrößenverteilung mittels dynamischer Bildanalyse bestimmt wird. Die Splitte wurden zusätzlich mittels Siebanalyse untersucht.

Die Reindichten der Proben wurden mit dem Heliumpyknometer, die Rohdichten mittels Wasser- bzw. Pulverpyknometrie bestimmt. Die Ermittlung der Wasseraufnahme erfolgte mit dem Standzylinderverfahren.

Die chemische Zusammensetzung der Proben wurde mittels Röntgenfluoreszenzanalyse an Pulverpräparaten ermittelt. Insgesamt wurden 39 Proben analysiert und ausgewählte Proben außerdem mit der Differentialthermoanalyse charakterisiert.

Die Schluffproben wurden als Rohstoff für die Herstellung von Leichtgranulaten verwendet. Dafür wurden verschiedene Mischungen hergestellt und thermisch behandelt. Als Gütekriterium erfolgte die Bewertung nach der Rohdichtemessung der Granulate.

Tabelle 2: Übersicht über die Probenahmen an der Bodenaufbereitungsanlage FEESS

Tabelle 1: Übersicht über die Probenahmen an der Bodenaufbereitungsanlage FEESS

Datum Probenahme	Ausgangsmaterial	Untersuchte Proben	IAB-Proben- bezeichnung	
27.07.2017	Boden-Bauschutt-Gemisch (RBB 0)	Schluff	17293	✓ vorh.
	Zusätzliche Probe außerhalb des eigentli- chen Probenahmeprogramms	Sand	17447	✓ vorh.
25.09.2017	Gleisschotter (GS 1)	Input		
		Schluff	17642 17643	✓ Bild ✓ Bild
		Sand	17646 17647	✓ Bild ✓ vorh.
04.12.2017	Boden-Bauschutt-Gemisch (RBB 1, BBS 1)	Input	17638 17639	✓ vorh. ✓ vorh.
		Schluff	17640 17641	✓ Bild ✓ vorh.
		Sand	17644 17645	✓ Bild ✓ Bild
		Splitt	17648 17649	✓ vorh. ✓ vorh.
23.02.2018	Boden-Bauschutt-Gemisch (RBB 2)	Input	18036 18037	✓ ?? ✓ vorh.
		Schluff	18038 18039	✓ vorh. ✓
		Sand	18040 18041 18042 18043	✓ ✓ ✓ ✓
		Splitt	18044 18045	✓ ✓
Probenübersicht Feess				
Datum Probenahme	Ausgangsmaterial	untersuchte Proben	IAB-Bez.	
03. oder 07.05.2018	Boden-Bauschutt-Gemisch (RBB 3)	Input	18319 18320	✓ -
		Schluff	18315 18316	✓ ✓
		Sand	18317 18318	✓ -
		Splitt	Keine Probe	
13.06.2018	Boden-Bauschutt-Gemisch (RBB 4)	Input	18313 18314	✓ ✓
		Schluff	18309 18310	✓ ✓
		Sand	18311 18312	✓ ✓
		Splitt	Keine Probe	
10.07.2018	Boden-Bauschutt-Gemisch (RBB 5)	Input	18512 18513	✓ ✓
		Schluff	18516 18517	✓ ✓
		Sand	18514 18515	✓ Bild ✓ Bild
		Splitt	Keine Probe	
17.07.2018	Gleisschotter (GS 2)	Input	18506 18507	✓ ✓
		Schluff	18510 18511	✓ ✓
		Sand	18508 18509	✓ ✓ Bild

Methodik der Probenahme und Probenbeschaffung

Ziel der Probenahme war es, für jede Materialcharge und deren nassklassierten Teilfraktionen aliquote Teilproben zu gewinnen, um diese mit diversen Laborversuchen der verschiedenen Projektpartner vergleichend untersuchen zu können.

Es wurden folgende Regelwerke und Normen berücksichtigt:

- BBodSchV (1999) bzw. Novelle BBodSchV in Artikel 2 der Kabinettsfassung der MantelV (2017, hier §§ 19 - 23)
- DIN ISO 10381-1, -2 (2003-08) – Bodenbeschaffenheit – Probenahme (Hinweise zur Strategie und allgemeinen Ausführung der Probenahme)
- DIN 19698 -1 (2014-05, segmentorientierte Probenahme von Haufwerken), DIN 19698-2 (2016-12, integrale Charakterisierung von Haufwerken) und LAGA PN 98 [2001, LAGA PN 98 (Vorgehensweise Beprobung von Abfällen)
- DIN EN 932-1 (1996-11, Probenahmeverfahren)
- DIN 19747 (2009-7, Probenvorbehandlung, -vorbereitung, -aufbereitung)

Zur Gewinnung von 2 (zum Teil 3) aliquoten Teilproben (TP) wurde wie folgt vorgegangen:

- Einzel-Entnahme als Mischprobe zu 50–60 l ($m = 70–84$ kg) aus ≥ 4 [DIN 19698], [LAGA PN 98] Einzelproben, tatsächlich ≥ 6 Einstiche aus den ohnehin schon sehr homogenen Haufwerken.
- Probenteilung in 2 (n) aliquote TP á 8 bis 9 Liter (11 – 13 kg) durch fraktionierendes Teilen [DIN EN 932-1], bei 2 Probenahmen wurde ein zweites Aliquot für ifeu gewonnen.
- Probenvorbehandlung: a.) Homogenisieren [DIN 19747] b.) Probenteilung durch fraktionierendes Schaufeln nach $m/(30n)$ [DIN EN 932-1], [LAGA PN 98], [DIN 19747] c.) Probenverpackung in Blechheimern und Lagerung bei Lufttemperatur in der Lagerhalle der Firma Feeß GmbH bis zum Versand

Die Dokumentation der Herkunft der Materialien und der Probenahme an der Nassklassierungsanlage erfolgte über Probenahmeprotokolle und fotografische Dokumentationen der Firma Feeß GmbH.

Tabelle 3 gibt Informationen zur Probenbeschaffung.

Tabelle 3: Informationen zur Probenbeschaffung an der Nassklassierungsanlage der Firma Feeß GmbH in Kirchheim unter Teck

Datum	Materialbezeichnung	Fraktionen	Probenbereitstellung
25.09.2017	Gleisschotter (GS I) Waschwasser	Inputmaterial, Schluff, Sand 0/2, Splitt 2/8, Splitt 8/16, Splitt 16/32, Splitt 32/56	ZAG: je 70 kg, alle Fraktionen IAB: je 50 kg, Schluff, Sand 0/2 ZAG: 4 Liter
07.12.2017	Rezykliertes Boden-/Bauschuttgemisch (RBB I) Waschwasser	Input, Schluff, 0/2, 2/8, 8/16, 16/32	ZAG: je 70 kg, alle IAB: je 40 kg, Input, Schluff, 0/2 ZAG: 4 Liter
23.01.2018	RBB II Waschwasser	Input, Schluff, 0/2, 2/8, 8/16, 16/32	ZAG: je 70 kg, alle IAB: je 40 kg, Input, Schluff, 0/2 ZAG: 4 Liter
07.05.2018	RBB III Waschwasser	Input, Schluff, 0/2, 2/8, 8/16	ZAG: je 70 kg, alle IAB: je 50 kg, Schluff, 0/2 IFEU: 5 kg, Schluff ZAG: 4 Liter
13.06.2018	RBB IV Waschwasser	Input, Schluff, 0/2, 2/8, 8/16	ZAG: je 70 kg, alle IAB: je 50 kg, Schluff, 0/2 IFEU: 5 kg, Schluff ZAG: 4 Liter
10.07.2018	RBB V Waschwasser	Input, Schluff, 0/2, 2/8, 8/16	ZAG: je 70 kg, alle IAB: je 50 kg, Schluff, 0/2 IFEU: 5 kg, Schluff ZAG: 4 Liter
17.07.2018	Gleisschotter (GS II) Waschwasser	Inputmaterial, Schluff, Sand 0/2, Splitt 2/8, Splitt 8/16, Splitt 16/32, Splitt 32/56	ZAG: je 70 kg, alle Fraktionen IAB: je 50 kg, Schluff, Sand 0/2 IFEU: 5 kg, Schluff ZAG: 4 Liter

Materialcharakterisierung im Labor

Die geotechnische Materialcharakterisierung erfolgte durch das IAB.

Probenvorbereitung für chemische Analysen

Herstellung von Teilproben für chemische Untersuchungen

Die Teilproben aus der Laboratoriumsprobe für die verschiedenen Untersuchungen im Labor wurden mit einem Riffelteiler hergestellt. Abbildung 5 zeigt einen Riffelteiler mit 8 Öffnungen mit einer Spaltbreite von 5 cm. Die Materialmenge der Teilproben für chemische Untersuchungen wurde in repräsentative Prüfproben geteilt. Jede Teilprobe wurde vor der weiteren Verarbeitung bei Raumtemperatur mehrere Tage an der Luft getrocknet und dann kühl und dunkel gelagert.



Abbildung 5: Probenteilung mit Riffelteiler

Sieben und Brechen

Für die Säulenversuche wurde gemäß DIN 19528 (2009) die Originalkörnung bis maximal 32 mm Größtkorn ohne Sieben und Brechen verwendet. Bei den Inputmaterialien wurde lediglich das Überkorn > 32 mm aussortiert.

Bestimmung von Wassergehalt und Korndichte der Materialproben

Als weitere wichtige Parameter zur Materialcharakterisierung für dieses Projekt wurden Wassergehalte und Korndichten der Materialproben bestimmt. Letztere sind für die Berechnung der Pumpraten der Peristaltikpumpen zur Einhaltung der geforderten konstanten Kontaktzeit von 5 Stunden nach DIN 19528 (2009) erforderlich. Zur Bestimmung wurde das luftgetrocknete Material in einer vorgewogenen Aluminiumschale bei 105 °C im Ofen 24 Stunden getrocknet und durch Rückwägung das Massendefizit bestimmt und der Feuchtegehalt berechnet.

Tabelle 4 listet die hier verwendeten Geräte und Verfahren für die Probenaufbereitung und Materialcharakterisierung.

Tabelle 4: Materialcharakterisierung: Geräte, Hersteller, Probentyp, Messverfahren

Gerät	Firma (Produkt)	Probentyp	Messparameter/-verfahren
Probenteiler	Retsch GmbH (RT 50)	fest	Probenteilung in Aliquote

Säulenversuche

Allgemeines

Säulenelutionsverfahren gehören zu den dynamischen Verfahren, da das Elutionsmittel kontinuierlich durch die Probe strömt und je nach Fragestellung, durch eine kontinuierliche Beprobung und Analyse, die zeitliche Konzentrationsentwicklung im Eluat verfolgt werden kann (vgl. Abbildung 6). Säulenperkulationsnormen ist gemeinsam, dass die Laborsäule im Aufwärtsstrom betrieben wird. Im ausführlichen Säulenversuch nach DIN 19528 werden grundsätzlich vier Perkolate gewonnen, also vier Laborproben analysiert, die jeweils nach Erreichen der Wasser-Feststoff-Verhältnisse (WF) von 0,3, 1, 2 und 4 gewonnen werden. Die Perkolation läuft jeweils weiter, so dass zum Beispiel bei 5 kg Prüfprobe Volumina von 1,5 Liter (= 0,3 x 5 kg), 3,5 Liter (= 0,7 x 5 kg), 5 Liter (= 1,0 x 5 kg) und 10 Liter (= 2 x 5 kg) gewonnen werden. Die Aufsummierung der (WF) ergibt letztlich das gesamte WF von 4. Beim WF 2-Säulenkurztest nach DIN 19528 wird die Perkolation bei Erreichen von WF 2 beendet (die gesamte Wassermenge wird in einer Flasche gesammelt und darin die kumulative Konzentration analysiert). Für bestimmte Fragestellungen kann die Säule über einen längeren Zeitraum durchströmt werden, zum Beispiel bis WF 10. Die kumulative Konzentration bis WF 10 kann mit Grenzwerten der aktuellen Erlasse verglichen werden, die derzeit in der Regel noch auf dem WF 10-Eluat beruhen. Die Berechnung der kumulativen Konzentration bis WF 2 oder bis WF 10 aus den aktuellen Konzentrationen gemessener Eluatfraktionen erfolgt nach Kapitel 9.4.3 der DIN 19528 (2009).

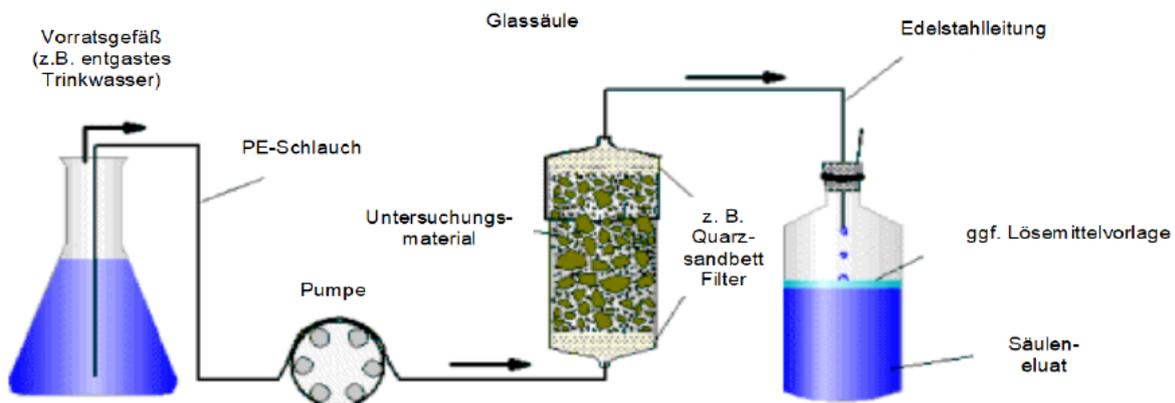


Abbildung 6: Schematischer Aufbau von dynamischen Elutionsverfahren (Säulenversuche, hierzu zählen auch Lysimeterversuche).

Säulenversuche des ZAG

Alle Säulenversuche wurden in einem 20°C Raum bei konstanter Temperatur durchgeführt. Unter Einhaltung der vorgeschriebenen Quotienten zwischen ID-Säule/Korndurchmesser und Füllhöhe/ID-Säule wurden für Proben mit einem maximalen Korndurchmesser von 22,4 mm kleine Glassäulen mit einem Innendurchmesser von 5 cm und einer Füllhöhe von 28 cm und für Proben mit Korndurchmessern bis 31,5 mm, große Säulen mit Innendurchmesser von 7 cm und einer Füllhöhe von 28 cm verwendet (vgl. Abbildung 7, ein Beispiel für große Säulen). An der Zu- und Ablaufleitung wurde etwas Quarzwolle unmittelbar vor die Leitungsöffnungen eingebracht, um eine Verstopfung der Leitungen zu vermeiden. Im unteren und oberen Abschnitt der Säule wurde, um ein gleichmäßiges An- und Abströmen des Wassers über den gesamten Querschnitt der Säule sicherzustellen, ein 1 cm mächtiges Quarzsandbett platziert. Es handelt sich hierbei um einen handelsüblichen gewaschenen Quarzsand der Körnung 0,6 bis 1,2 mm, der nur an der Luft getrocknet wurde (keine Ofentrocknung, da sonst Laborhintergrundkontaminationen über die Laborluft eingefangen werden können). Grobe

Materialproben mit großen Poren wurden abweichend von der Norm nicht mit Quarzsandschichten überdeckt, weil es sonst zu einem Einsickern des Sandes in diese Poren kommen kann. Für die Wasserzufuhr wurden Teflonleitungen eingesetzt, für die Wasserabfuhr Edelstahlleitungen. Als Eluent wurde MilliQ Wasser (Millipore, MA, USA) eingesetzt (entspricht Wasser, deionisiert mit einer maximalen Leitfähigkeit von 0,5 mS/m, entsprechend Qualität 3 nach DIN ISO 3696). Der Eluent wurde in einer 50 Liter-Korbflasche aus Glas vorgehalten. Die Fließraten für die Aufsättigung der Säulen und die eigentliche Perkolations während des Säulenversuches wurden mittels einer Peristaltikpumpe angepasst. Nach DIN 19528 wurde die Pumprate so eingestellt, dass eine Aufsättigungsdauer von 2 Stunden und eine konstante Kontaktzeit von 5 Stunden resultiert - die Pump- und Fließraten sind von der Säulendimension, und der Einbau- und Korndichte des Materials abhängig. Spätestens 1 Stunde nach Aufsättigung wurde der Versuch sofort gestartet. Die Pumpraten der Peristaltikpumpe wurden nach jedem Flaschenwechsel überprüft und ggf. adjustiert. Die Eluatfraktionen wurden hier entsprechend der vorgeschriebenen *WF*-Raten und zusätzlich bei *WF* 10 beprobt: 0,3, 1, 2, 4 L/kg. Die Eluate wurden in Glasflaschen aufgefangen und im Kühlraum bei 4 °C gelagert. Sammelflaschen zum Auffangen von Eluaten für die nachfolgende Analyse auf PAK wurden verdeckelt und das Tefloninlay mit der Edelstahlröhre der Säulenablenkung durchstoßen. Sehr große Eluatmengen einer Fraktion mussten in mehreren Flaschen gesammelt und wieder kombiniert werden.



Abbildung 7: Säulenversuchsaufbau im Labor. Eigene Fotografie des ZAG Tübingen.

Aufbereitung und Analyse der Eluate

Das Eluat wurde für die unterschiedlichen chemischen Analysen in eine geeignete Anzahl von Teilproben geteilt und nach den Anforderungen der spezifischen Analyseverfahren und nach DIN EN ISO 5667-3 konserviert.

Die Teilproben der Eluate für die Untersuchung organischer Stoffe wurde aufgrund Trübe werte γ 100 FNU ohne weitere Aufbereitung direkt für die Analyse verwendet. Teilproben der Eluate für die Analyse von DOC, Ionen (Ionenchromatographie, IC) und Metallen wurden gemäß Norm über einen Membranfilter der Porengröße von 0,45 μ m filtriert.

Hydrogeochemische Begleitparameter:

Trübe, Leitfähigkeit und pH wurden unverzüglich, spätestens aber innerhalb von 2 Tagen nach Probenahme, im nicht weiter aufbereiteten Eluat untersucht. Die Eluate wurden per IC auf folgende Ionen analysiert: Anionen: Brom (Br), Chlorid (Cl), Fluorid (F), Nitrat (NO₃), Nitrit (NO₂), Phosphat (PO₄), Sulfat (SO₄). Kationen: Ammonium (NH₄), Calcium (Ca), Kalium (K), Natrium (Na), Magnesium (Mg).

Metalle

Für die Metallanalytik wurden aus dem filtrierten Eluat 100 ml Teilproben gewonnen, angesäuert und im Labor der GIU GmbH per induktiv gekoppelter Plasma-Massenspektroskopie (ICP/MS) auf folgende Substanzen analysiert:

Aluminium (Al), Antimon (Sb), Arsen (As), Barium (Ba), Blei (Pb), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Cobalt (Co), Kupfer (Cu), Mangan (Mn), Molybdän (Mo), Nickel (Ni), Quecksilber (Hg), Silicium (Si), Strontium (Sr), Zink (Zn) und Vanadium (V).

Organika

Die Eluatfraktionen WF 2 und bei ausführlichen Säulenversuchen WF 1, 2, 4 und 10 L/kg wurden auf Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) analysiert. Eine möglichst große Menge Eluat (bestenfalls 800 ml) wurde in einer 1 Liter Braunglasflasche mit 10 µL dotiertem internen Standard (PAK-Mix 31, enthält folgende fünf deuterierte PAK: Naphthalin-d₈, Acenaphthen-d₁₀, Phenanthren-d₁₀, Chrysen-d₁₂ und Perylen-d₁₂, Dr. Ehrenstorfer GmbH) und 10 ml Cyclohexan für 30 Minuten auf dem Rolltisch geschüttelt und über Nacht gelagert. Sobald sich die Cyclohexanphase abgetrennt hatte, wurde das überstehende Cyclohexan mit einer Pasteurpipette abgezogen und mit Natriumsulfat getrocknet. Mit einem Vapotherm der Firma Barkey wurde das abgenommene Cyclohexan unter einem leichten Stickstoff-Gasstrom auf ca. 100 µl eingengt. Diese Extrakte wurden dann von chemisch-technische Assistenten im Laboratorium des ZAG Tübingen mittels HPLC mit DAD/Fluoreszenzdetektion (DIN EN ISO 17993 bzw. DIN CEN/TS 16181) gemessen. Für Kontrolluntersuchungen bzw. zur Plausibilisierung der PAK-Werte kamen Messungen im GC-MS zum Einsatz.

Die im Lösemittelextrakt enthaltenen PAK wurden auf folgende Einzelspezies analysiert (Sortierung nach aufsteigender Kondensation/Molekülgewicht): Naphthalin (Nap), 1-Methylnaphthalin (1-MNap), 2-Methylnaphthalin (2-MNap), Acenaphthylen (Any), Acenaphthen (Ace), Fluoren (Fln), Phenanthren (Phe) Anthracen (Ant), Fluoranthen (Fth), Pyren (Py), Benz[a]anthracen (BaA), Chrysen (Chr), Summe aus Benzo[b]fluoranthen und Benzo[k]fluoranthen (BbF-BkF), Benzo[a]pyren (BaP), Dibenz[a,h]anthracen (DahA), Indeno[1,2,3-c,d]pyren (Indeno), Benzo[g,h,i]perylene (BghiP). Tabelle 5 gibt weiter Informationen zur Analytik.

Tabelle 5: Analytik - Geräte, Normen, Nachweisgrenzen der untersuchten Analyten

Gerät	Norm	Nachweisgrenze	Zusatzinformationen	Durchführung
pH-, Leitfähigkeitsmessgeräte			pH Meter (540 GLP) WTW GmbH, LF-Messgerät (LF 91) WTW GmbH	ZAG Tübingen
Trübungsmessgerät			Turbidimeter (Modell 2100N) Hach Lange GmbH	ZAG Tübingen

Total organic carbon Analyzer	DIN EN 1484 (1997)	TOC, 0,5 mg/L	High TOC Analysator (Winhigh TOC), Elementar Analysensystem GmbH, Kalibrierungsbereich: 0–20 mg/L, per Definition entspricht gemessener Wert DOC, wenn Partikel im Eluat < 0,45 µm	GIU GmbH
Ionenchromatograph (IC)	DIN EN ISO 10304-1:2009-07	Brom (Br), Chlorid (Cl), Fluorid (F), Nitrat (NO ₃), Nitrit (NO ₂), Phosphat (PO ₄), Sulfat (SO ₄), Ammonium (NH ₄), Calcium (Ca), Kalium (K), Natrium (Na), Magnesium (Mg),	Dionex IonPac AS23 Analytical & Guard Columns (DX-120), Dionex GmbH, DColumen: Thermo Scientific Catalog No.: NC0096031: IonPac CS12A-5 µm Analytical Column (3 x 150 mm);	ZAG Tübingen
HPLC mit DAD / Fluoreszenzdetektion Zur Plausibilisierung im Einzelfall: Gaschromatographisches Massenspektrometer (GCMS)	DIN EN ISO 17993 bzw. DIN CEN/TS 16181	PAK, <0,00001 mg/L	HPLC mit DAD / Fluoreszenzdetektion, GC/MS-System (GC 5890 Series II / MSD 5973), Hewlett Packard GmbH, Trennsäule DB-5MS (Länge: 30 m; Filmdicke: 0,25 µm; I.D.: 0,25 mm) der Firma J&W Scientific.	ZAG Tübingen
induktiv gekoppelter Plasma-Massenspektrometer (ICP/MS)	DIN EN ISO 17294-2:2005-02 & DIN EN 1483 (Hg)	<0,0001 mg/L (Hg), <0,001 mg/L (Cd), <0,005 mg/L (As, Ba, B, Pb, Co, Cu, Mo, Tl, V), <BG1 mg/L (Sb, Ni, Zi), <0,05 mg/L (Al, Se)	ICP-MS	GIU GmbH

Gesamtumfang der Laborversuche und Analytik

In Tabelle 6 sind alle hier durchgeführten Laborversuche und Untersuchungsumfänge, sortiert nach folgenden Fragstellungen aufgeführt.

Tabelle 6: Gesamtüberblick Untersuchungsmaterialien und Laboruntersuchungsumfang.

Untersuchungs-material	Bereitsteller / Herkunft	Untersuchungen	Untersuchte Fraktionen	Ziel	Anzahl Versuche
5 rezyklierte Boden-Bauschutt Gemische	Feeß GmbH Nassklassierungsanlage in Kirchheim unter Teck	WF 2 – SV (kurz)	Input (WF 2 + ausf.) Schluff (WF 2 + ausf.) Sand 0/2 (WF 2 + ausf.) Splitt 2/8 (WF 2)	Beurteilung WF 2 und Gehalte nach MantelV (2017) Beurteilung WF 10 und Gehalte nach VwV Boden (2007), LAGA TR Boden (2005), LAGA M 20 (1997)	28 SV davon 6 zusätzliche ausführliche SV 22 Extraktionen
1 Aufbaugranulat (IAB)		2 ausführliche Säulenversuche mit RBB 3 und 5	Aufbaugranulat original (WF 2)		
		Feststoffextraktionen	Aufbaugranulat gebrochen (WF 2)		
2 Gleisschotter		WF 2 – SV (kurz)	Input (WF 2) Schluff (WF 2) Sand 0/2 (WF 2) Splitt 2/8 (WF 2) Splitt 8/16 (GS-1, WF 2) Splitt 16/32 (GS-1, WF 2)		10 SV 10 Extraktionen

Tabelle 7 summiert den Untersuchungs- und Analytikumfang im Rahmen dieses Projektes.

Tabelle 7: Überblick über Anzahl der Laborversuche und des Analytikumfanges.

Laborversuch	Anzahl Laborversuche	Anzahl Fraktionen zur Analyse	Analytikumfang
Feststoffanalytik	32	32	Trockenrückstand, TOC, Cyanide, (ges.), MKW, EOX, PCB 28, PCB 52, PCB 101, PCB 118, PCB 153, PCB 138, PCB 180, 16 PAK, Sb, As, Ba, B, Pb, Cd, Cr, Co, Cu, Mo, Ni, Hg, Se, Tl, V, Zn
SV nach DIN 19528 Kurzttest bis WF 2	32	32	4 hydrogeochem. Param: pH, Lf, Trübe, DOC
SV nach DIN 19528, ausführlich bis WF 10 (5 Fraktionen)	6	30	12 Ionen: Br, Cl, F, NO ₃ , NO ₂ , PO ₄ , SO ₄ , NH ₄ , Ca, K, Na, Mg 17 Metalle: Al, Sb, As, Ba, B, Pb, Cd, Cr, Co, Cu, Mo, Ni, Hg, Se, Tl, V, Zn Organika: 16 EPA PAK + 2 Methylnaphthaline

			Für 2 Gleisschotter in insgesamt 10 WF 2-Eluaten 13 Herbizide: Atrazin, Simazin, Bromacil, Desethylatrazin, Hexazinon, Dimefuron, Diuron, Flumioxazin, Flazasulfuron, Thiazafluron, Ethidimuron, Glyphosat, Ampa
--	--	--	--

Summen

Feststoffextrakte	32		248 hydrogeochemische Parameter, 744 Ionen, 1054 Metalle, ca. 900 PAK-Einzelspezies 130 Herbizid-Einzelspezies
Eluate	38	62	

Methodik der Auswertung der Messergebnisse von Säulenversuchen für fachliche Fragestellungen

Die Messergebnisse von Konzentrationen in Säuleneluaten werden hier den *WF* als Konzentrations-/*WF*-Plots gegenübergestellt. Die Konzentration *C* ist dabei die aktuelle Konzentration ("Momentankonzentration") im Säuleneluat zum Probenahmezeitpunkt. Bei den Säulenversuchen ergibt sich *WF* durch Bezug der kumulativen Säuleneluatmenge (Aufsummierung der Säuleneluatmengen zu jedem Probenahmezeitpunkt) auf die Trockenmasse des eingebauten Untersuchungsmaterials in der Säule. Die beobachteten absoluten Zeitskalen hängen von der Dimension und der Fließgeschwindigkeit des Säulenversuches ab. Der Vorteil von *C/WF*-Plots liegt in der Möglichkeit des direkten Vergleichs von Messergebnissen verschiedener Elutionsmethoden mit unterschiedlichen absoluten Zeitskalen, da die Zeit mit *WF* normiert wird. *WF* stellt eine dimensionslose Zeit dar und berücksichtigt die Trockenraumdichten ebenso, wie den wassererfüllten Porenraum. Liegt ein reiner Lösungsprozess unter Gleichgewichtsbedingungen vor, hängt die aktuelle Konzentration im einfachsten Fall und beim Vergleich von Versuchen mit ähnlichen Verhältnissen zwischen wassererfülltem Porenraum und Trockenraumdichten nur von der Wassermenge ab, mit der die Feststoffmasse in Kontakt stand. Dann kommen die Konzentrationsganglinien verschiedener Versuche mit verschiedener Dimensionierung und mit verschiedenen absoluten Zeitskalen aufeinander zu liegen (vgl. Susset & Leuchs, 2008 sowie Grathwohl & Susset, 2009).

Mit Säulenkurztests nach DIN 19528 oder Schüttelversuchen nach DIN 19529 (Batchtests) und DIN 38414-4 (zurückgezogen) wird eine "kumulative" oder integrierte Stoffkonzentration im Sickerwasser bei einem bestimmten *WF* gemessen. Auch diese kumulativen Konzentrationen können gemeinsam mit Ergebnissen der ausführlichen Säulenversuche gegen *WF* dargestellt werden. Bei gleichem *WF* liegt die Konzentration des Schütteleluates oder des kumulativen Säuleneluates entsprechend oberhalb der aktuellen Konzentration der dynamischen Tests. Die kumulative Konzentration im *WF* 2-Säuleneluat kann aus den aktuellen Konzentrationen im Säuleneluat berechnet werden, sofern eine kontinuierliche Messreihe vorliegt, indem der Konzentrationsverlauf integriert wird. Die rechnerisch "kumulierten" oder integrierten Säuleneluatkonzentrationen zum Probenahmezeitpunkt *k* werden aus den

Konzentrationen und WF des vorhergehenden Probenahmezeitpunkts $k-1$ nach folgender Formel 1 berechnet:

Formel 1: Berechnung der kumulativen Konzentration bei einer bestimmten Wasser-/Feststoffrate aus den aktuellen Konzentrationen (z.B. rechnerisches WF 2-Säulenkurzeluat)

$$C_{w,kum}^k = (((C_w^{k-1} + C_w^k) / 2 * (WF^k - WF^{k-1})) + (C_{w,kum}^{k-1} * WF^{k-1})) / WF^k$$

$C_{w,kum}$ bezeichnet die rechnerisch kumulierte Konzentration (wird auch als integrierte Konzentration bezeichnet), C_w die aktuelle Säuleneluatkonzentration zum Probenahmezeitpunkt ("Momentankonzentration") und WF das (kumulative) Wasser-/Feststoffverhältnis (bei der ersten Probenahme gilt $C_w = C_{w,kum}$).

Die kumulierte Säuleneluatkonzentration kann selbstverständlich auch gemessen werden, indem das Säuleneluat bis zu einem entsprechenden WF gesammelt wird (z.B. Sammlung des Säuleneluates in einem Probenahmegefäß bis WF 2, vgl. „Säulenkurztest“ nach DIN 19528). Diese entspricht theoretisch dem rechnerischen Integralwert eines ausführlichen Säulenversuchs bis zum entsprechenden WF gemäß Formel 1.

Im Rahmen dieses Projekts wurde grundsätzlich die graphische Darstellungsform der C/WF -Plots mit Momentan- und kumulativen Konzentrationen verwendet, um z. B. die Übertragbarkeiten verschiedener Testergebnisse zu interpretieren oder kumulative Konzentrationen mit Grenzwerten zu vergleichen.

Teilprojekt des ZAG Tübingen: Material und Methoden

Im Rahmen dieses Teilprojektes wurden nassklassierte Fraktionen aus 5 Chargen Boden-Bauschutt-Gemischen und 2 Chargen Gleisschotter an der Nassklassierungsanlage qualifiziert beprobt, geteilt und für die Feststoffextraktionen und Laborsäulenversuche nach geltenden Normen vorbereitet.

Es wurden 38 Säulenversuche nach DIN 19528 und 32 Feststoffextraktionen durchgeführt.

Der Analytikumfang umfasst 248 hydrogeochemische Parameter, 744 Ionen, 1054 Metalle, ca. 900 PAK-Einzelspezies und 130 Herbizid-Einzelspezies.

3. Messergebnisse zur Identifizierung bewertungs- und regelungsrelevanter Parameter

3.1 Statistische Auswertung der Messergebnisse zur Identifizierung bewertungs- und regelungsrelevanter Parameter

Zur Identifizierung bewertungs- und regelungsrelevanter Stoffe und Parameter in Eluaten und Feststoffgehalten der nassklassierten Materialfraktionen wurde nach dem UBA-Fachkonzept zur Ableitung von Materialwerten für mineralische Ersatzbaustoffe in der geplanten MantelV vorgegangen (siehe UBA-Text 26/2018, Kapitel 2.4.2 in Susset et al., 2018):

Die **bewertungsrelevanten Stoffe und Parameter** werden auf der Grundlage einer statistischen Auswertung der Konzentrationsverteilungen in *WF 2*-Säulenkurzeluaten nach DIN 19528 und im Feststoffgehalt identifiziert. Dazu werden die statistischen Kennwerte Minimum (Min), Maximum (Max), Mittelwerte (Mittel), Median (entspricht dem 50. Perzentilwert) und die Perzentilwerte bei 70, 80 und 90 Prozent bestimmt. **Bewertungsrelevant sind nach dem UBA-Fachkonzept aus Sicht des Grundwasserschutzes alle Stoffe, die in *WF 2*-Eluaten mit dem 90. Perzentil oberhalb der Geringfügigkeitsschwellenwerte⁴ der LAWA (2017) liegen.** Bewertungsrelevant sind aus Sicht des Bodenschutzes alle Stoffe, die im Feststoffgehalt mit dem 90. Perzentil oberhalb der Bodenvorsorgewerte⁵ nach E-Novelle BBodSchV in der geplanten MantelV des BMUB (2017) liegen. Aus den verschiedenen Kennwerten wird auch die Variabilität der Konzentrationen ersichtlich.

Nachfolgend werden für die hier untersuchten nassklassierten Materialfraktionen nur solche Stoffe und Parameter weiter betrachtet, die die GFS im 90. Perzentil überschreiten. Alle weiteren Messwerte werden im CD-ROM-Anhang tabellarisch dokumentiert. Für Forschungsfragestellungen werden auch andere Substanzen unabhängig von ihrer Bewertungsrelevanz untersucht. Darüberhinausgehend wurden folgende Stoffe im Feststoff bestimmt, für die keine Bewertungskriterien vorliegen: Phenole, Cyanide, (ges.), Barium, Bor und die Summe aus Naphthalin und Methylnaphthalinen. Die Messergebnisse werden nachrichtlich im CD-ROM-Anhang tabellarisch dokumentiert. Darüberhinausgehend wurden auch folgende Stoffe im Eluat bestimmt, für die keine Bewertungskriterien vorliegen: Weitere der insgesamt 16 PAK –Einzelspezies, Nitrat, Nitrit, Brom, Bor, Phosphat, Natrium, Ammonium-Nitrat, Kalium, Magnesium. Auch diese Messergebnisse werden nachrichtlich im CD-ROM-Anhang tabellarisch dokumentiert.

In der EBV ist geplant in der Praxis der Güteüberwachung nur solche Stoffe regelmäßig im Rahmen der Güteüberwachung zu untersuchen, die regelungsrelevant sind. **Stoffe sind für die EBV dann regelungsrelevant, wenn die 90. Perzentile in *WF 2*-Säulenkurzeluaten die GFS oder Bezugsmaßstäbe überschreiten und wenn diese Konzentrationen zu einer Limitierung der Einsetzbarkeit des**

⁴ Konzentration eines Stoffes, die nicht dazu geeignet ist, eine signifikante Änderung des chemischen Zustandes des Grundwassers hervorzurufen (Geringfügigkeitsschwelle, GFS; LAWA, 2017). Diese wurden durch die LAWA für relevante Substanzen auf der Grundlage von öko- und / oder humantoxikologischen Untersuchungen abgeleitet.

⁵ Nach dem Grundprinzip in den materiellen Regelungen in der geplanten Novelle BBodSchV gilt (vgl. Susset et al., 2018): Halten Materialien die einfachen bodenartspezifischen Vorsorgewerte ein, geht man von einer nicht schädlichen Bodenverunreinigung aus (vorsorgender Bodenschutz) und auch grundsätzlich von einer Einhaltung der Eluatwerte (vorsorgender Grundwasserschutz) und letztlich von einer bedenkenlosen Verwendbarkeit aus. Es werden auch Materialien zugelassen, die die einfachen bodenartspezifischen Vorsorgewerte bis maximal zum doppelten Vorsorgewert für die Bodenart Lehm/Schluff überschreiten, wenn für die betroffenen Stoffe und Parameter festgestellt ist, dass die Eluatwerte nach BBodSchV für die Verfüllung von Abgrabungen eingehalten werden.

bestimmten mineralischen Ersatzbaustoffes im Hinblick auf die medienschutzbasierten Einbauwerte führen. Hieraus wurden dann für die 17 verschiedenen mineralischen Ersatzbaustoffe so genannte Materialwerte und bei starker Variation der Konzentrationen auch verschiedene Materialklassen abgeleitet.

Zur Bestimmung der **regelungsrelevanten Stoffe und Parameter in den nassklassierten Fraktionen der Rezyklierten Boden-Bauschutt-Gemische und der Gleisschottermaterialien** werden die statistischen Kennwerte der Konzentrationsverteilungen in *WF 2*-Säulenkurzeluaten nach DIN 19528 und im Feststoffgehalt mit den Materialwerten der günstigsten Materialklassen der mineralischen Ersatzbaustoffe Bodenmaterial und RC-Baustoffe in technischen Bauwerken nach EBV verglichen (vgl.). Für Gleisschotter werden zusätzlich die Materialwerte der günstigsten Materialklasse für Gleisschotter in technischen Bauwerken nach EBV herangezogen. Dieser Vergleich mit Materialwerten verschiedener mineralischer Ersatzbaustoffe ist dem Umstand geschuldet, dass nicht immer klar ist, ob die nassklassierten Fraktionen als Bodenmaterial, RC-Baustoff oder Gleisschotter einzustufen sind.

Im Einzelnen handelt es sich um die Materialwerte im *WF 2*-Eluat und im Feststoffgehalt für die Bodenmaterialklasse BM-F0* (günstigste Bodenmaterialklasse mit maximalen Anteilen mineralischer Fremdbestandteile von 50 Volumenprozent, zulässig in allen technischen Einbauweisen der geplanten EBV). Für die Schwermetalle Antimon, Kobalt, Molybdän, Selen und Vanadium gibt es weder Vorsorgewerte noch Materialwerte im Feststoffgehalt. Hierfür werden ersatzweise die in Tabelle 5 der geplanten Novelle der BBodSchV (MantelV, BMUB 2017) in Verbindung mit §8 (7) geregelten Werte für zusätzlich zu untersuchende Stoffe beim Auf- oder Einbringen von Materialien mit mehr als 10 Volumenprozent mineralischer Fremdbestandteile unterhalb oder außerhalb einer durchwurzelbaren Bodenschicht herangezogen. Des Weiteren werden für diese Vergleiche die Materialwerte im Eluat und im Feststoff der günstigsten Klasse RC-1 herangezogen. Die Materialwerte im Eluat für RC-1 wurden grundsätzlich an die medienschutzbasierten Einbauwerte für alle technischen Einbauweisen der EBV über Sand mit den höchsten Anforderungen an den Medienschutz angepasst, um alle offenen Bauweisen über Sand ohne weitere Einschränkungen zu regeln. Für RC-1 existiert für den Feststoffgehalt nur ein Materialwert für die $\Sigma 15$ EPA PAK. In den Tabellen zur Bewertung der Feststoffgehalte werden zusätzlich die so genannten Überwachungswerte im Feststoff für RC-Baustoffe herangezogen. Diese sind im Rahmen der Güteüberwachung nach geplanter EBV beim einmaligen Eignungsnachweis und bei jeder zweiten Fremdüberwachung zu überprüfen und bei Abweichungen sind die Ursachen zu ermitteln und Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Für die Gleisschottermaterialien müssen zusätzlich die Materialwerte im *WF 2*-Eluat für die Materialklasse 0 der Gleisschotter, GS-0 (Herbizide, MKW, PAK), herangezogen werden, da hier spezifische Werte für die Herbizide geregelt sind.

3.2 Bewertungs- und regelungsrelevante Stoffe und Parameter für nassklassierte Fraktionen aus rezyklierten Boden-Bauschutt-Gemischen (RBB)

Bewertungs- und regelungsrelevante Stoffe und Parameter in *WF 2*-Eluaten

Tabelle 8 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF 2*-Eluate nach DIN 19528 (2009) für alle RBB-Materialfraktionen, die nach dem UBA-Fachkonzept als nicht bewertungsrelevant beurteilt werden, weil Überschreitungen der GFS entweder nur im Maximalwert auftreten, die 90. Perzentilwerte unterschreiten oder alle Konzentrationen die GFS oder die Bestimmungsgrenze unterschreiten.

Tabelle 8: Nicht bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Rezyklierte Boden-Bauschuttgemische (RBB I bis V, alle Fraktionen), Gesamtdatensatz für alle Materialchargen und

Fraktionen: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in WF 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze. Überschreitungen der GFS durch das 90. Perz. oder/und den Maximalwert fett gedruckt.

Daten- grundl agen	stat. Kenn- größen	Fluorid [mg/L]	Chlorid [mg/L]	Sulfat [mg/L]	Blei [µg/L]	Cadmium [µg/L]	Nickel [µg/L]	Quecksil ber [µg/L]	Thallium [µg/L]
		GFS: 0,9	GFS: 250	GFS: 250	GFS: 1,2	GFS: 0,3	GFS: 7	GFS: 0,1	GFS: 0,2
Gesamt - daten- satzRB B alle Fraktio nen	n	19	20	20	20	20	20	20	20
	Min	0,08	1	22	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
	Max	0,83	26	273	2,8	<BG	5,7	0,09	<BG
	Mittel	0,33	10	103	0,3	<BG	1,7	0,03	<BG
	Median	0,31	7	101	<BG	<BG	1,6	0,00	<BG
	70. Perz.	0,39	14	109	0,4	<BG	2,2	0,06	<BG
	80. Perz.	0,47	16	170	0,4	<BG	2,6	0,06	<BG
	90. Perz.	0,52	22	177	0,6	<BG	3,8	0,08	<BG

Daten- grundl agen	Stat. Kenn- größen	Zink [µg/L]	Antimon [µg/L]	Molybdän [µg/L]	Selen [µg/L]	Nap und M-Nap [µg/L]	Anthracen [µg/L]	Dibenzo (ah)anthracen [µg/L]
		GFS: 60	GFS: 5	GFS: 35	GFS: 3	GFS: 2	GFS: 0,1	GFS: 0,01
Gesamt - daten- satzRB B alle Fraktio nen	n	20	20	20	20	20	20	20
	Min	<BG	0,3	2,6	0,2	<BG	<BG	<BG
	Max	72	2,4	32	4	0,1	0,28	0,04
	Mittel	5	1,0	11	0,9	<BG	0,04	0,01
	Median	<BG	1,1	8	0,6	<BG	0,01	<BG
	70. Perz.	<BG	1,4	12	0,9	<BG	0,02	0,01
	80. Perz.	1	1,6	19	1	<BG	0,04	0,01
	90. Perz.	8	2,0	25	2	<BG	0,13	0,02

Tabelle 9 zeigt die statistischen Kennwerte der Konzentrationen in WF 2-Eluate nach DIN 19528 (2009) für alle RBB-Materialfraktionen, die nach dem UBA-Fachkonzept als bewertungsrelevant und/oder als regelungsrelevant beurteilt werden. Die Parameter Leitfähigkeit und pH-Wert sind Orientierungswerte (Indikatorparameter) und haben keinen Grenzwertcharakter. Arsen, Chrom, (ges.), Kupfer und Vanadium sind zwar bewertungsrelevant (< 90. Perzentile übersteigen die GFS) aber nicht regelungsrelevant (selbst die Materialwerte der günstigsten Materialklassen der EBV werden immer eingehalten). Es kann festgestellt werden, dass in WF 2- Eluaten aller Materialchargen- und fraktionen lediglich die Σ 15 EPA PAK regelungsrelevant sind, da sie die Materialwerte der günstigsten Materialklasse BM-F0* überschreiten. Der Materialwert für die Σ 15 EPA PAK für die günstigste RC-Klasse RC-1 mit vielfältigen zulässigen Einbauweisen in technischen Bauwerken nach EBV wird auch durch die Σ 15 EPA PAK stets eingehalten.

Tabelle 9: Bewertungs- und/oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Rezyklierte Boden-Bauschuttgemische (RBB I bis V, alle Fraktionen), Gesamtdatensatz für alle Materialchargen und Fraktionen: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in WF 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze. Überschreitungen der GFS durch verschiedene statistische Kennwerte sind fett gedruckt. Überschreitungen von Materialwerten der günstigsten Klasse BM-F0* oder RC-1 durch verschiedene statistische Kennwerte sind fett und kursiv gedruckt.

Daten- grundl agen	Stat. Kenn- größen	pH []	Leitf. [$\mu\text{S cm}^{-1}$]	Arsen [$\mu\text{g L}^{-1}$]	Chrom (ges.) [$\mu\text{g L}^{-1}$]	Kupfer [$\mu\text{g L}^{-1}$]	Vanadium [$\mu\text{g L}^{-1}$]	$\Sigma 15$ EPA PAK [$\mu\text{g L}^{-1}$]
		BM-F0*: 6,5 - 9,5 RC-1: 6 - 13	BM-F0*: 350 RC-1: 2.500	GFS: 3,2 BM- F0*: 15 RC-1: -	GFS: 3,4 BM-F0*: 15 RC-1: 150	GFS: 5,4 BM-F0*: 30 RC-1: 110	GFS: 4 BM-F0*: 30 RC-1: 120	GFS: 0,2 BM-F0*: 0,3 RC-1: 6
Gesamt - daten- satzRB B alle Fraktio nen	n	20	20	20	20	20	20	20
	Min	6,5	35	0,9	<BG	1,0	1	0,02
	Max	11,3	758	13,6	28,7	35,2	41	4,71
	Mittel	8,8	361	3,6	5,5	9,2	9	0,72
	Median	8,3	402	2,9	2,6	6,6	5	0,33
	70. Perz.	9,4	463	3,4	4,8	8,6	7	0,66
	80. Perz.	10,4	505	4,5	7,3	12,7	11	0,87
90. Perz.	10,9	584	7,3	11,2	17,6	24	1,18	

Tabelle 10 zeigt statistische Kennwerte der Konzentrationen in WF 2-Eluate für bewertungsrelevante PAK-Einzelspezies für die GFS festgelegt wurden (LAWA, 2017). Die Einzelspezies sind zwar bewertungsrelevant aber nicht regelungsrelevant, da die Materialqualitäten im Eluat von mineralischen Ersatzbaustoffen mit Ausnahme eines Materialwerts von BM-0* für die Summe von Naphthalin und Methylnaphthalinen in der geplanten EBV alleine über die $\Sigma 15$ EPA PAK im Eluat beurteilt wird.

Tabelle 10: Bewertungsrelevante PAK-Einzelspezies, Rezyklierte Boden-Bauschuttgemische (RBB I bis V, alle Fraktionen), Gesamtdatensatz für alle Materialchargen und Fraktionen: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in WF 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze. Überschreitungen der GFS durch verschiedene statistische Kennwerte sind fett gedruckt.

Daten- grundl agen	Stat. Kenn- größen	Fluor- anthen [$\mu\text{g L}^{-1}$]	Benzo- (b-k)fluoranthen [$\mu\text{g L}^{-1}$]	Benzo- (a)pyren [$\mu\text{g L}^{-1}$]	Benzo- (ghi)perylen [$\mu\text{g L}^{-1}$]	Indeno- (1,2,3cd)pyren [$\mu\text{g L}^{-1}$]
		GFS: 0,1	GFS: 0,03	GFS: 0,01	GFS: 0,002	GFS: 0,002
Gesamt - daten- satzRB B alle Fraktio nen	n	20	20	19	20	20
	Min	<BG	<BG	0,00	<BG	<BG
	Max	1,15	0,63	0,21	0,137	0,147
	Mittel	0,15	0,10	0,04	0,024	0,026
	Median	0,07	0,03	0,02	0,007	0,008
	70. Perz.	0,12	0,12	0,05	0,027	0,031
	80. Perz.	0,13	0,17	0,06	0,036	0,039
90. Perz.	0,26	0,25	0,13	0,078	0,093	

Bewertungs- und regelungsrelevanter Stoffe im Feststoff

Tabelle 11 zeigt die statistischen Kennwerte der Feststoffkonzentrationen für alle RBB-Materialfraktionen, die nach dem UBA-Fachkonzept als nicht bewertungsrelevant- oder regelungsrelevant beurteilt werden, weil Überschreitungen der bodenartsspezifischen Bodenvorsorgewerte für Sand entweder nur im Maximalwert auftreten, die 90. Perzentilwerte unterschreiten oder alle Konzentrationen die Vorsorgewerte oder die Bestimmungsgrenze unterschreiten.

Tabelle 11: Nicht bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Rezyklierte Boden-Bauschuttgemische (RBB I bis V, alle Fraktionen), Gesamtdatensatz für alle Materialchargen und Fraktionen: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen im Feststoff. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze, ÜW = Überwachungswert nach Tabelle 2.2 EBV. Überschreitungen der Bodenvorsorgewerte (Sand) durch das 90. Perz. oder/und den Maximalwert fett gedruckt.

Daten- grundl agen	stat. Kenn- größen	Blei [mg/kg]	Cadmium [mg/kg]	Chrom, (ges.) [mg/kg]	Kupfer [mg/kg]	Quecksilber [mg/kg]	Thallium [mg/kg]
		VW (S): 40 BM-F0*/RC- 1 (ÜW): 140	VW (S): 0,4 BM-F0*/RC- 1 (ÜW): 2	VW (S): 30 BM-F0*/RC-1 (ÜW): 120	VW (S): 20 BM-F0*/RC- 1 (ÜW): 80	VW (S): 0,2 BM-F0*/RC- 1 (ÜW): 0,6	VW (S): 0,5 BM-F0*/RC- 1 (ÜW): 2
Gesamt - daten- satzRB B alle Fraktio nen	n	20	20	20	20	20	20
	Min	3,9	0,1	9,0	3,7	0,00	0,0
	Max	49,2	0,5	38,5	44,1	0,31	0,4
	Mittel	20,9	0,3	18,9	17,5	0,07	0,2
	Median	16,0	0,2	15,2	14,1	0,05	0,1
	70. Perz.	26,3	0,4	20,6	18,5	0,08	0,2
80. Perz.	29,9	0,4	27,8	26,0	0,12	0,3	
90. Perz.	45,3	0,4	32,9	35,6	0,21	0,4	

Daten- grundl agen	stat. Kenn- größen	Antimon [mg/kg]	Kobalt [mg/kg]	Molybdän [mg/kg]	Selen [mg/kg]	Vanadium [mg/kg]	ΣPCB [mg/kg]
		E-BBodSchV Tab. 5: 4	E-BBodSchV Tab. 5: 50	E-BBodSchV Tab. 5: 4	E-BBodSchV Tab. 5: 3	E-BBodSchV Tab. 5: 200	RC (ÜW): 0,15
Gesamt - daten- satzRB B alle Fraktio nen	n	20	20	20	20	20	20
	Min	<BG	2,2	0,2	<BG	12	0,00
	Max	0,4	48	1,2	2,1	44	2,00
	Mittel	0,2	13	0,4	0,7	23	0,11
	Median	0,1	5,2	0,3	0,5	20	0,01
	70. Perz.	0,2	11	0,5	0,7	22	0,01
80. Perz.	0,3	14	0,5	0,8	34	0,02	
90. Perz.	0,4	45	0,6	1,9	39	0,02	

Daten- grundl agen	stat. Kenn- größen	Kohlenwasserstoffe C10 bis C 22	Kohlenwasserstoffe C10 bis C 40	PCB ₆ und PCB-118 [mg/kg]	EOX [mg/kg]
--------------------------	--------------------------	------------------------------------	------------------------------------	---	----------------

		BM-F0*: 300	BM-F0*: 600	BM-0*: 0,1	BM-0*: 1
Gesamt - daten- satzRB B alle Fraktio nen	n	20	20	20	20
	Min	<BG	<BG	<BG	<BG
	Max	29	191	2,0	2,1
	Mittel	2	86	<BG	0,7
	Median	<BG	89	<BG	0,5
	70. Perz.	<BG	101	<BG	0,7
	80. Perz.	<BG	115	<BG	0,8
	90. Perz.	<BG	125	<BG	1,9

Tabelle 12 zeigt die statistischen Kennwerte der Konzentrationen im Feststoff für alle RBB-Materialfraktionen, die als bewertungs- und/oder regelungsrelevant beurteilt werden. Arsen, Nickel und Zink sind zwar bewertungsrelevant (< 90. Perzentile übersteigen die bodenartspezifischen Vorsorgewerte für Sandböden) aber nicht regelungsrelevant (selbst die Materialwerte der günstigsten Materialklassen der EBV werden immer eingehalten). Es kann festgestellt werden, dass in den Feststoffgehalten aller Materialchargen- und fraktionen die $\Sigma 15$ EPA PAK regelungsrelevant ist, da sie die Materialwerte der günstigsten Materialklasse BM-F0* und RC-1 deutlich überschreiten. BaP ist ein bewertungsrelevanter Stoff aber nicht regelungsrelevant, da für dieses PAK-Einzelspezies kein separater Materialwert existiert. Die $\Sigma 15$ EPA PAK im Feststoffgehalt der RBB-Fraktionen sind demnach die einzige Stoffgruppe, die die Verwendung der nassklassierten Materialien limitieren können.

Tabelle 12: Bewertungs- und/oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Rezyklierte Boden-Bauschuttgemische (RBB I bis V, alle Fraktionen), Gesamtdatensatz für alle Materialchargen und Fraktionen: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen im Feststoff. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze, ÜW = Überwachungswert nach Tabelle 2.2 EBV. Überschreitungen der Bodenvorsorgewerte (Sand) durch das 90. Perz. oder/und den Maximalwert fett gedruckt. Überschreitungen von Materialwerten der günstigsten Klasse BM-F0* oder RC-1 durch verschiedene statistische Kennwerte sind fett und kursiv gedruckt.

Daten- grundl agen	Stat. Kenn- größen	Arsen [mg/kg]	Nickel [mg/kg]	Zink [mg/kg]	Benz(a)pyren [mg/kg]	$\Sigma 16$ EPA PAK [mg/kg]
		VW (S): 10	VW (S): 15	VW (S): 60	VW (S): 0,3	VW (S): 3
		BM-F0*/RC-1 (ÜW): 40	BM-F0*/RC-1 (ÜW): 100	BM-F0*/RC-1 (ÜW): 300	BM-F0*/RC-1 (ÜW): 6/10	
Gesamt - daten- satzRB B alle Fraktio nen	n	20	20	20	20	20
	Min	4,4	9,5	17	<BG	<BG
	Max	16	44	131	6,0	82
	Mittel	8,8	21	56	1,0	15
	Median	7,9	17	47	0,4	6,6
	70. Perz.	9,3	21	59	0,9	13
80. Perz.	13	32	87	1,1	19	
90. Perz.	15	39	105	2,9	39	

Messergebnisse für die Waschwässer

Tabelle 13 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der Waschwässer, die parallel zur Beprobung der 5 RBB-Chargen aus dem Schlauchabfluss gewonnen wurden. Zur Orientierung werden die Konzentrationen mit den GFS verglichen, falls diese für den jeweiligen Stoff/Parameter festgelegt wurden.

Die Charge RBB I wurde nach der Nassklassierung von Gleisschottermaterialien gewaschen. Um zu überprüfen, ob es in der Waschanlage zu Verschleppungen von Schadstoffen (Memoryeffekte) zwischen den Waschgängen kommt wurden im Waschwasser von RBB I auch die für Gleisschotter typischen Herbizide untersucht (siehe Tabelle 13, unten).

Die Waschwässer zeigen erwartungsgemäß sehr hohe Trübewerte, elektrische Leitfähigkeiten und Sulfatwerte. Weiter auffällig sind Konzentrationen oberhalb der GFS von Arsen, Cadmium, Chrom, (ges.), Kupfer, Molybdän, Vanadium und sehr hohe Konzentrationen der $\Sigma 15$ EPA PAK. Herbizide waren im Waschgang der ersten RBB-Charge kurz nach der Gleisschotter-Wäsche nicht nachweisbar.

Tabelle 13: Stoffe und Parameter in Waschwässern aus der Nassklassierung Rezyklierte Boden-Bauschuttgemische (RBB I bis V): Statistische Kenngrößen der Konzentrationen. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze. Überschreitungen der GFS sind fett gedruckt.

Daten- grundlag en	stat. Kenn- größen	Trübe [FNU]	DOC [mg/l]	pH []	Lf [μ S/cm]	Fluorid [mg/l]	Chlorid [mg/l]	Sulfat [mg/l]	
						GFS: 0,9	GFS: 250	GFS: 250	
Gesamt- daten- satzRBB alle Probena hmen	n	5	5	5	5	4	5	5	
	Min	10	12	6,8	1451	0,2	87	212	
	Max	2370	28	9,6	2710	0,6	212	1399	
	Mittel	518	20	7,7	2130	0,4	144	669	
	Median	38	19	7,3	2020	0,4	117	561	
	70. Perz.	126	23	7,5	2532	0,6	187	612	
	80. Perz.	592	25	8,0	2670	0,6	206	779	
	90. Perz.	1481	26	8,8	2690	0,6	209	1089	
Daten- grundl agen	Stat. Kenn- größen	Antimon [μ g/L]	Arsen [μ g/L]	Blei [μ g/L]	Bor [μ g/L]	Cadmium [μ g/L]			
		GFS: 5	GFS: 3,2	GFS: 1,2	GFS: 180	GFS: 0,3			
Gesamt- daten- satzRB B alle Fraktio nen	n	5	5	5	5	5	5		
	Min	0,6	2,1	0,0	0,2	0,2	0,4		
	Max	1,9	4,6	0,5	1,5	1,5	1,7		
	Mittel	1,4	3,7	0,2	0,5	0,5	0,9		
	Median	1,7	4,0	0,2	0,3	0,3	0,4		
	70. Perz.	1,8	4,4	0,4	0,4	0,4	1,3		
	80. Perz.	1,8	4,6	0,4	0,6	0,6	1,6		
	90. Perz.	1,9	4,6	0,4	1,1	1,1	1,6		

Daten- grundl agen	Stat. Kenn- größen	Chrom, (ges.) [µg/L]	Kupfer [µg/L]	Molybdän [µg/L]	Nickel [µg/L]	Quecksilber [µg/L]	
		GFS: 3,4	GFS: 5,4	GFS: 35	GFS: 7	GFS: 0,1	
Gesamt - daten- satzRB B alle Fraktio nen	n	5	5	5	5	5	
	Min	1,7	10	21	4,4	0,1	
	Max	54	49	87	14	0,1	
	Mittel	17	29	51	8,8	0,1	
	Median	11	21	47	9,6	0,1	
	70. Perz.	14	40	58	11	0,1	
	80. Perz.	22	46	66	12	0,1	
90. Perz.	38	48	76	13	0,1		
Daten- grundl agen	Stat. Kenn- größen	Thallium [µg/L]	Vanadium [µg/L]	Zink [µg/L]	Σ15 EPAPAK [µg/L]	Nap und M-Nap [µg/L]	
		GFS: 0,2	GFS: 4	GFS: 60	GFS: 0,2	GFS: 2	
Gesamt - daten- satzRB B alle Fraktio nen	n	5	5	5	5	5	
	Min	<BG	1,0	5,0	1,8	<BG	
	Max	0,1	9,6	19	12	0,1	
	Mittel	<BG	3,0	11	6,5	<BG	
	Median	<BG	1,3	13	5,8	<BG	
	70. Perz.	0,1	1,7	15	8,5	<BG	
	80. Perz.	0,1	3,4	17	9,7	0,1	
90. Perz.	0,1	6,5	18	11	0,1		
Daten- grundl agen	Stat. Kenn- größen	Anthracen [µg/L]	Fluor- anthen [µg L ⁻¹]	Benzo- (b- k)fluoranthen [µg L ⁻¹]	Benzo(a)pyr- en [µg/L]	Dibenzo (a, h)anthracen [µg/L]	Benzo- (ghi)perylen [µg L ⁻¹]
		GFS: 0,1	GFS: 0,1	GFS: 0,03	GFS: 0,01	GFS: 0,01	GFS: 0,002
Gesamt - daten- satzRB B alle Fraktio nen	n	5	5	5	5	5	5
	Min	0,042	0,073	0,303	0,161	0,027	0,039
	Max	1,228	2,585	1,798	0,926	0,180	0,488
	Mittel	0,360	1,220	0,893	0,465	0,092	0,191
	Median	0,160	0,840	0,528	0,440	0,064	0,103
	70. Perz.	0,268	2,001	1,213	0,583	0,141	0,209
	80. Perz.	0,482	2,350	1,467	0,681	0,164	0,286
90. Perz.	0,855	2,467	1,632	0,803	0,172	0,387	
Daten- grundl agen	Stat. Kenn- größen	Atracin [µg/L]	Simazin [µg L ⁻¹]	Bromacil [µg L ⁻¹]	Desethylatr- acin [µg/L]	Hexazinon [µg/L]	Dimefuron [µg L ⁻¹]
						GFS: 0,07	
	n	1	1	1	1	1	1

einmalig bei RBB	Messwert	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
Daten- grundlagen	Stat. Kenn- größen	Diuron [µg/L]	Flumioxazin [µg L⁻¹]	Flaza-sulfuron [µg L⁻¹]	Thiazafluron [µg/L]	Ethidimuron [µg/L]	ΣHerbizide [µg L⁻¹]
		GFS: 0,1					
einmalig bei RBB I	n	1	1	1	1	1	1
	Messwert	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
Daten- grundlagen	Stat. Kenn- größen	Glyphosat [µg/L]	Ampa [µg L⁻¹]				
einmalig bei RBB I	n	1	1				
	Messwert	<BG	<BG				

3.3 Bewertungs- und regelungsrelevante Stoffe und Parameter für nassklassierte Fraktionen aus Gleisschottermaterialien (GS)

Bewertungs- und regelungsrelevanter Stoffe und Parameter in WF 2-Eluaten

Tabelle 14 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der WF 2-Eluate nach DIN 19528 (2009) für alle Gleisschotter-Materialfraktionen, die nach dem UBA-Fachkonzept als nicht bewertungsrelevant beurteilt werden, weil Überschreitungen der GFS entweder nur im Maximalwert auftreten, die 90. Perzentilwerte unterschreiten oder alle Konzentrationen die GFS oder die Bestimmungsgrenze unterschreiten. Für die im Folgenden aufgeführten Einzelspezies und Summenparameter der Herbizide sind bisher keine GFS eingeführt worden. Hier werden für die Vergleiche die Materialwerte der günstigsten Materialklasse GS-0 herangezogen.

Tabelle 14: Nicht bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Gleisschottermaterialien (GS I bis II, alle Fraktionen), Gesamtdatensatz für alle Materialchargen und Fraktionen: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in WF 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze. Überschreitungen der GFS durch das 90. Perz. oder/und den Maximalwert fett gedruckt.

Daten- grundl agen	stat. Kenn- größen	Fluorid [mg/L]	Chlorid [mg/L]	Sulfat [mg/L]	Blei [µg/L]	Cadmium [µg/L]	Chrom, (ges.) [µg/L]	Nickel [µg/L]
		GFS: 0,9	GFS: 250	GFS: 250	GFS: 1,2	GFS: 0,3	GFS: 3,4	GFS: 7
Gesamt - daten- satz GS alle Fraktio nen	n	10	10	10	10	10	10	10
	Min	<BG	<BG	2	<BG	<BG	<BG	<BG
	Max	0,75	17	224	0,4	<BG	1,3	11
	Mittel	0,22	5	48	0,1	<BG	0,2	1,9
	Median	<BG	2	13	0,0	<BG	<BG	<BG
	70. Perz.	0,31	7	39	0,0	<BG	<BG	1,9
	80. Perz.	0,48	12	62	0,1	<BG	0,2	3,5
90. Perz.	0,72	15	143	0,3	<BG	1,2	4,4	

Daten- grundl agen	Stat. Kenn- größen	Quecksilber [µg/L]	Thallium [µg/L]	Zink [µg/L]	Antimon [µg/L]	Molybdän [µg/L]	Selen [µg/L]	Vanadium [µg/L]
		GFS: 0,1	GFS: 0,2	GFS: 60	GFS: 5	GFS: 35	GFS: 3	GFS: 4
Gesamt - daten- satz GS alle Fraktio nen	n	10	10	10	10	10	10	10
	Min	<BG	<BG	<BG	0,1	0,2	<BG	<BG
	Max	0,10	0,1	68	5,6	153	1	7
	Mittel	0,02	<BG	8	1,3	25	0,2	1
	Median	<BG	<BG	<BG	0,5	5	0,1	1
	70. Perz.	0,02	<BG	<BG	1,1	20	0,2	2
	80. Perz.	0,05	<BG	<BG	2	2,0	27	<BG
90. Perz.	0,06	<BG	<BG	18	3,6	56	<BG	

Daten- grundla- gen	Stat. Kenn- größen	Nap und M-Nap [µg/L]	Anthracen [µg/L]	Dibenzo (ah) anthracen [µg/L]	Atrazin [µg/L]	Bromacil [µg/L]	Simazin [µg/L]	sonst. Herbizide [µg/L]
		GFS: 2	GS-0: 0,1	GS-0: 0,2	GS-0: 0,2	GS-0: 0,2	GS-0: 0,2	GS-0: 0,2
Gesamt- daten- satz GS alle Fraktio- nen	n	10	10	10	10	10	10	10
	Min	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
	Max	0,5	0,39	0,05	0,09	0,07	0,19	0,38
	Mittel	0,1	0,07	0,01	0,03	0,01	0,05	0,06
	Median	<BG	0,02	<BG	0,01	0,00	0,04	0,00
	70. Perz.	<BG	0,05	<BG	0,04	0,01	0,06	0,07
	80. Perz.	<BG	0,10	<BG	0,05	0,03	0,08	0,09
	90. Perz.	0,1	0,14	0,02	0,07	0,04	0,10	0,15

Tabelle 15 zeigt die statistischen Kennwerte der Konzentrationen in WF 2-Eluaten nach DIN 19528 (2009) für alle GS-Materialfraktionen, die nach dem UBA-Fachkonzept als bewertungsrelevant und/oder als regelungsrelevant beurteilt werden. Die Parameter Leitfähigkeit und pH-Wert sind Orientierungswerte (Indikatorparameter) und haben keinen Grenzwertcharakter. Arsen und Kupfer sind zwar bewertungsrelevant (< 90. Perzentile übersteigen die GFS) aber nicht regelungsrelevant (selbst die Materialwerte der günstigsten Materialklassen der EBV werden immer eingehalten). Es kann festgestellt werden, dass in WF 2- Eluaten aller Materialchargen- und fraktionen die $\Sigma 15$ EPA PAK, Diuron, Glyphosat und AMPA regelungsrelevant sind, da sie die Materialwerte der günstigsten Materialklasse BM-F0* und GS-0 überschreiten.

Tabelle 15: Bewertungs- und/oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Gleisschottermaterialien (GS I bis V, alle Fraktionen), Gesamtdatensatz für alle Materialchargen und Fraktionen: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in WF 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze. Überschreitungen der GFS durch verschiedene statistische Kennwerte sind fett gedruckt. Überschreitungen von Materialwerten der günstigsten Klasse BM-F0* oder GS-0 durch verschiedene statistische Kennwerte sind fett und kursiv gedruckt.

Daten- grundla- gen	Stat. Kenn- größen	pH []	Leitf. [µS cm ⁻¹]	Arsen [µg L ⁻¹]	Kupfer [µg L ⁻¹]	$\Sigma 15$ EPA PAK [µg L ⁻¹]
		BM-F0*: 6,5 - 9,5 GS-0: 6,5 - 10	BM-F0*: 350 GS-0: 500	GFS: 3,2 BM-F0*: 15 GS-0: -	GFS: 5,4 BM-F0*: 30 GS-0: -	GFS: 0,2 BM-F0*: 0,3 GS-0: 0,3
Gesamt- daten- satz GS alle Fraktio- nen	n	10	10	10	10	10
	Min	7,3	33,5	0,6	1,0	0,01
	Max	9,0	602	8,5	39	10,9
	Mittel	8,0	20	2,8	6,6	1,34
	Median	7,9	121	1,5	2,2	0,14
	70. Perz.	7,9	295	2,7	3,6	0,27
	80. Perz.	8,1	316	4,0	5,6	0,62
	90. Perz.	8,6	415	7,7	12,4	2,47

Tabelle 16 zeigt statistische Kennwerte der Konzentrationen in WF 2-Eluate für bewertungsrelevante PAK-Einzelspezies für die GFS festgelegt wurden (LAWA, 2017). Die Einzelspezies sind zwar bewertungsrelevant aber nicht regelungsrelevant, da die Materialqualitäten im Eluat von mineralischen Ersatzbaustoffen mit Ausnahme eines Materialwerts von BM-0* für die Summe von Naphthalin und Methylnaphthalinen in der geplanten EBV alleine über die $\Sigma 15$ EPA PAK im Eluat beurteilt wird.

Tabelle 16: Bewertungsrelevante PAK-Einzelspezies, Gleisschottermaterialien (GS I bis V, alle Fraktionen), Gesamtdatensatz für alle Materialchargen und Fraktionen: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in WF 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze. Überschreitungen der GFS durch verschiedene statistische Kennwerte sind fett gedruckt.

Daten- grundl agen	Stat. Kenn- größen	Fluor- anthen [$\mu\text{g L}^{-1}$]	Benzo- (b-k)fluoranthen [$\mu\text{g L}^{-1}$]	Benzo(a)pyren [$\mu\text{g/L}$]	Benzo- (ghi)pyren [$\mu\text{g L}^{-1}$]	Indeno- (1,2,3cd)pyren [$\mu\text{g L}^{-1}$]
		GFS: 0,1	GFS: 0,03	GFS: 0,01	GFS: 0,002	GFS: 0,002
Gesamt - daten- satz GS alle Fraktio nen	n	10	10	10	10	10
	Min	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
	Max	2,79	0,96	0,36	0,191	0,199
	Mittel	0,31	0,16	0,06	0,030	0,032
	Median	0,02	0,02	0,01	0,000	0,003
	70. Perz.	0,04	0,05	0,02	0,011	0,015
	80. Perz.	0,08	0,16	0,06	0,034	0,035
	90. Perz.	0,43	0,48	0,19	0,090	0,097

Tabelle 17 zeigt statistische Kennwerte der Konzentrationen in WF 2-Eluate für regelungsrelevante Herbizide-Einzelspezies. Die Einzelspezies sind regelungsrelevant, da die Konzentrationen die Materialwerte der günstigsten Materialklasse GS-0 überschreiten.

Tabelle 17: Bewertungsrelevante Herbizide-Einzelspezies, Gleisschottermaterialien (GS I bis V, alle Fraktionen), Gesamtdatensatz für alle Materialchargen und Fraktionen: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in WF 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze. Überschreitungen der GS-0-Werte durch verschiedene statistische Kennwerte sind fett gedruckt.

Daten- grundl agen	Stat. Kenn- größen	Diuron [$\mu\text{g L}^{-1}$]	Glyphosat [$\mu\text{g L}^{-1}$]	AMPA [$\mu\text{g/L}$]
		GFS: 0,1 GS-0: 0,1	GFS: - GS-0: 0,2	GFS: - GS-0: 2,5
Gesamt - daten- satz GS alle Fraktio nen	n	10	10	10
	Min	<BG	<BG	<BG
	Max	0,79	3,79	8,60
	Mittel	0,21	0,56	1,69
	Median	0,05	0,16	0,35
	70. Perz.	0,18	0,30	1,87
	80. Perz.	0,49	0,42	2,81
	90. Perz.	0,72	1,15	3,65

Bewertungs- und regelungsrelevanter Stoffe im Feststoff

Tabelle 18 zeigt die statistischen Kennwerte der Feststoffkonzentrationen für alle GS-Materialfraktionen, die nach dem UBA-Fachkonzept als nicht bewertungsrelevant- oder regelungsrelevant beurteilt werden, weil Überschreitungen der bodenartspezifischen Bodenvorsorgewerte für Sand entweder nur im Maximalwert auftreten, die 90. Perzentilwerte unterschreiten oder alle Konzentrationen die Vorsorgewerte oder die Bestimmungsgrenze unterschreiten.

Tabelle 18: Nicht bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Gleisschottermaterialien (GS I bis II alle Fraktionen), Gesamtdatensatz für alle Materialchargen und Fraktionen: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen im Feststoff. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze. Überschreitungen der Bodenvorsorgewerte (Sand) durch das 90. Perz. oder/und den Maximalwert fett gedruckt.

Daten- grundl agen	stat. Kenn- größen	Blei [mg/kg]	Thallium [mg/kg]	Antimon [mg/kg]	Molybdän [mg/kg]	Selen [mg/kg]	Vanadium [mg/kg]	ΣPCB [mg/kg]
		VW (S): 40 BM-F0*: 140	VW (S): 0,5 BM-F0*: 2	E- BBodSchV Tab. 5: 4	E- BBodSchV Tab. 5: 4	E-BBodSchV Tab. 5: 3	E- BBodSchV Tab. 5: 200	RC (ÜW): 0,15
Gesamt - daten- satz GS alle Fraktio nen	n	7	6	7	7	7	7	7
	Min	3,7	0,1	0,1	0,3	0,3	26,3	<BG
	Max	79,9	0,4	4,7	2,2	1,8	57,4	<BG
	Mittel	24,6	0,2	1,9	1,4	1,0	37,3	<BG
	Median	14,7	0,2	1,1	1,6	0,9	36,4	<BG
	70. Perz.	22,3	0,3	3,1	2,1	1,6	38,7	<BG
	80. Perz.	38,6	0,3	3,6	2,1	1,7	40,0	<BG
90. Perz.	58,4	0,3	4,2	2,2	1,8	47,3	<BG	
Daten- grundl agen	stat. Kenn- größen	Kohlenwasserstoffe C10 bis C 40		PCB ₆ und PCB-118 [mg/kg]				
		BM-F0*: 600		BM-0*: 0,1				
Gesamt - daten- satz GS alle Fraktio nen	n	4		7				
	Min	25		<BG				
	Max	207		<BG				
	Mittel	98		<BG				
	Median	80		<BG				
	70. Perz.	98		<BG				
	80. Perz.	134		<BG				
90. Perz.	171		<BG					

Tabelle 19 zeigt die statistischen Kennwerte der Konzentrationen im Feststoff für alle GS-Materialfraktionen, die als bewertungs- und/oder regelungsrelevant beurteilt werden. Arsen, Cadmium, Chrom, (ges.), Nickel und Quecksilber sind zwar bewertungsrelevant (< 90. Perzentile

übersteigen die bodenartspezifischen Vorsorgewerte für Sandböden) aber nicht regelungsrelevant (selbst die Materialwerte der günstigsten Materialklassen der EBV werden immer eingehalten). Es kann festgestellt werden, dass in den Feststoffgehalten aller Materialchargen- und fraktionen Kupfer und die $\Sigma 15$ EPA PAK regelungsrelevant sind, da sie die Materialwerte der günstigsten Materialklasse BM-F0* deutlich überschreiten. BaP ist ein bewertungsrelevanter Stoff aber nicht regelungsrelevant, da für dieses PAK-Einzelspezies kein separater Materialwert existiert. Die $\Sigma 15$ EPA PAK und Kupfer im Feststoffgehalt der GS-Fraktionen sind demnach die einzige Stoffgruppe, die die Verwendung der nassklassierten Materialien limitieren könnten.

Tabelle 19: Bewertungs- und/oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Gleisschottermaterialien (GS I bis II alle Fraktionen), Gesamtdatensatz für alle Materialchargen und Fraktionen: Statistische Kenngrößen der Feststoffkonzentrationen. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze. Überschreitungen der GFS durch verschiedene statistische Kennwerte sind fett gedruckt. Überschreitungen von Materialwerten der günstigsten Klasse BM-F0* durch verschiedene statistische Kennwerte sind fett und kursiv gedruckt.

Daten- grundl agen	Stat. Kenn- größen	Arsen [mg/kg]	Cadmium [mg/kg]	Chrom, ges. [mg/kg]	Kupfer [mg/kg]	Nickel [mg/kg]
		VW (S): 10 BM-F0*: 40	VW (S): 0,4 BM-F0*: 2	VW (S): 30 BM-F0*: 120	VW (S): 20 BM-F0*: 80	VW (S): 15 BM-F0*: 100
Gesamt - daten- satzRB B alle Fraktio nen	n	7	7	7	7	7
	Min	2,5	0,1	27	13	20
	Max	16	0,8	59	129	94
	Mittel	7,9	0,3	42	57	56
	Median	5,3	0,2	41	40	62
	70. Perz.	10	0,4	48	60	65
80. Perz.	13	0,6	48	95	67	
90. Perz.	14	0,7	53	116	78	

Daten- grundl agen	Stat. Kenn- größen	Quecksilber [mg/kg]	Zink [mg/kg]	Kobalt [mg/kg]	Benz(a)pyren [mg/kg]	$\Sigma 16$ EPA PAK [mg/kg]
		VW (S): 0,2 BM-F0*: 0,6	VW (S): 60 BM-F0*: 300	VW (S): - E-BBodSchV Tab. 5: 50	VW (S): 0,3	VW (S): 3 BM-F0*: 6
Gesamt - daten- satzRB B alle Fraktio nen	n	3	7	7	9	9
	Min	0,06	53	14	<BG	<BG
	Max	0,24	523	97	8,5	125
	Mittel	0,17	165	54	2,0	32
	Median	0,21	102	71	0,9	13
	70. Perz.	0,22	142	79	1,9	40
80. Perz.	0,23	194	83	3,1	58	
90. Perz.	0,23	336	89	5,3	80	

Messergebnisse der Waschwässer

Tabelle 20 zeigt die statistischen Kennwerte der Analyseergebnisse der Waschwässer, die parallel zur Beprobung der 2 GS-Chargen aus dem Schlauchabfluss gewonnen wurden. Zur Orientierung werden die Konzentrationen mit den GFS verglichen, falls diese für den jeweiligen Stoff/Parameter festgelegt wurden. Da nur 2 Messergebnisse vorliegen werden lediglich die Kennwerte Min, Max und die arithmetischen Mittelwerte angegeben. Die Waschwässer zeigen erwartungsgemäß geringere Trübewerte, elektrische Leitfähigkeiten und Sulfatwerte als die Boden-Bauschuttgemische. Auffällig sind Konzentrationen oberhalb der GFS von Arsen, Cadmium, Chrom, (ges.), Kupfer, Molybdän, Vanadium und sehr hohe Konzentrationen der $\Sigma 15$ EPA PAK. Herbizide waren im Waschwasser der ersten GS-Charge erwartungsgemäß nachweisbar. Die Konzentrationen sind aber gering und unterschreiten die GFS bzw. die GS-0-Werte.

Tabelle 20: Stoffe und Parameter in Waschwässern aus der Nassklassierung von Gleisschottermaterialien (GS I bis II): Statistische Kenngrößen der Konzentrationen. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze. Überschreitungen der GFS sind fett gedruckt.

Daten- grundlag en	stat. Kenn- größen	Trübe [FNU]	DOC [mg/l]	pH []	Lf [μ S/cm]	Fluorid [mg/l]	Chlorid [mg/l]	Sulfat [mg/l]
						GFS: 0,9	GFS: 250	GFS: 250
Gesamt- daten- satz GS	n	2	2	2	2	2	2	2
	Min	34	15	6,8	1670	0,1	83	714
	Max	49	18	8,7	1792	0,5	93	753
	Mittel	42	17	7,8	1731	0,3	88	733

Daten- grundl agen	Stat. Kenn- größen	Antimon [μ g/L]	Arsen [μ g/L]	Blei [μ g/L]	Bor [μ g/L]	Cadmium [μ g/L]	Chrom, (ges.) [μ g/L]
		GFS: 5	GFS: 3,2	GFS: 1,2	GFS: 180	GFS: 0,3	GFS: 3,4
Gesamt - daten- satz GS	n	2	2	2	2	2	2
	Min	2,6	1,6	<BG	0,2	0,3	<BG
	Max	2,7	4,3	0,2	0,3	0,5	6,1
	Mittel	2,6	3,0	0,1	0,3	0,4	3,0

Daten- grundl agen	Stat. Kenn- größen	Kupfer [μ g/L]	Molybdän [μ g/L]	Nickel [μ g/L]	Quecksilber [μ g/L]	Thallium [μ g/L]	Vanadium [μ g/L] GFS:	Zink [μ g/L]
		GFS: 5,4	GFS: 35	GFS: 7	GFS: 0,1	GFS: 0,2	4	GFS: 60
Gesamt - daten- satz GS	n	2	2	2	2	2	2	2
	Min	28	35	7,0	0,1	<BG	<BG	5,0
	Max	37	59	11	0,1	0,1	4	14
	Mittel	33	47	9,0	0,1	0,1	2	9,5

Daten- grundl agen	Stat. Kenn- größen	Σ15 EPAPAK [µg/L]	Nap und M-Nap [µg/L]	Anthracen [µg/L]	Fluor- anthen [µg L ⁻¹]	Benzo- (b-k) fluoranthen [µg L ⁻¹]	Benzo(a)pyre n [µg/L]
		GFS: 0,2	GFS: 2	GFS: 0,1	GFS: 0,1	GFS: 0,03	GFS: 0,01
Gesamt - daten- satz GS	n	2	2	2	2	2	2
	Min	1,1	<BG	0,05	0,20	0,21	0,09
	Max	47	<BG	0,76	5,98	12,6	5,39
	Mittel	24	<BG	0,40	3,09	6,48	2,74

Daten- grundl agen	Stat. Kenn- größen	Dibenzo (a, h) anthracen [µg/L]	Benzo- (ghi)peryle n [µg L ⁻¹]	Atracin [µg/L]	Simazin [µg L ⁻¹]	Bromacil [µg L ⁻¹]	Desethyl- atracin [µg/L]
		GFS: 0,01	GFS: 0,002				
Gesamt - daten- satz GS	n	2	2	1	1	1	1
	Min	0,02	0,05				
	Max	0,65	2,16	0,06	0,10	0,03	0,08
	Mittel	0,33	1,11				

Daten- grundl agen	Stat. Kenn- größen	Hexazinon [µg/L]	Dime- furon [µg L ⁻¹]	Diuron [µg/L]	Flumioxazin [µg L ⁻¹]	Flaza-sulfuron [µg L ⁻¹]	Thiazafluron [µg/L]
		GFS: 0,07		GFS: 0,1			
nur eine Messu ng	n	1	1	1	1	1	1
	Messwer t	<BG	<BG	0,023	<BG	<BG	<BG

Daten- grundl agen	Stat. Kenn- größen	Ethidimuron [µg/L]	ΣHerbizide [µg L ⁻¹]	Glyphosat [µg/L]	Ampa [µg L ⁻¹]
nur eine Messu ng	n	1	1	1	1
		<BG	0,293	<BG	0,29

Teilprojekt des ZAG Tübingen: Ergebnisse I: Identifizierung bewertungs- und regelungsrelevanter Stoffe

Zur Identifizierung bewertungs- und regelungsrelevanter Stoffe und Parameter in Eluaten und Feststoffgehalten der nassklassierten Materialfraktionen wurde nach dem UBA-Fachkonzept auf der Grundlage einer **statistischen Auswertung der Konzentrationsverteilungen in WF 2-Säulenkurzeluaten nach DIN 19528 und im Feststoffgehalt** vorgegangen. Dazu werden die statistischen Kennwerte Minimum (Min), Maximum (Max), Mittelwerte (Mittel), Median (entspricht dem 50. Perzentilwert) und die Perzentilwerte bei 70, 80 und 90 Prozent bestimmt.

Bewertungsrelevant sind nach dem UBA-Fachkonzept aus Sicht des Grundwasserschutzes alle Stoffe, die in **WF 2-Eluaten mit dem 90. Perzentil oberhalb der Geringfügigkeitsschwellenwerte** der LAWA (2017) liegen. **Bewertungsrelevant** sind aus Sicht des Bodenschutzes alle Stoffe, die im **Feststoffgehalt mit dem 90. Perzentil oberhalb der Bodenvorsorgewerte** nach E-Novelle BBodSchV in der geplanten MantelV des BMUB (2017) liegen.

Stoffe sind für die **EBV dann regelungsrelevant**, wenn **die 90. Perzentile in WF 2-Säulenkurzeluaten** die GFS oder Bezugsmaßstäbe **überschreiten** und wenn diese Konzentrationen zu einer Limitierung der Einsetzbarkeit des bestimmten mineralischen Ersatzbaustoffes im Hinblick auf die medienschutzbasierten Einbauwerte führen. Zur Bestimmung der regelungsrelevanten Stoffe und Parameter in den nassklassierten Fraktionen der Rezyklierten Boden-Bauschutt-Gemische und der Gleisschottermaterialien werden die statistischen Kennwerte der Konzentrationsverteilungen in **WF 2-Säulenkurzeluaten nach DIN 19528 und im Feststoffgehalt mit den Materialwerten der günstigsten Materialklassen** der mineralischen Ersatzbaustoffe Bodenmaterial und RC-Baustoffe in technischen Bauwerken nach EBV verglichen. Für Gleisschotter werden zusätzlich die Materialwerte der günstigsten Materialklasse für Gleisschotter in technischen Bauwerken nach EBV herangezogen. **Überschreiten Messwerte die Materialwerte der günstigsten Materialklasse können diese die Verwertungsmöglichkeiten limitieren.** Tabelle 21 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse (vgl. nachfolgendes Kapitel).

Tabelle 21: Zusammenfassende Übersicht zu den statistisch identifizierten bewertungs- oder regelungsrelevanten Stoffen und Parametern im Feststoff und Eluat aller nassklassierten Fraktionen der hier untersuchten 5 Boden-Bauschuttgemische und 2 Gleisschotter, sowie relevante Konzentrationen

Material	WF 2-Eluate		Feststoffgehalte		Waschwasser Stoffe/Parameter die, die GFS überschreiten
	Bewertungsrelevant	Regelungsrelevant	Bewertungsrelevant	Regelungsrelevant	
RBB alle 5 Chargen/Fraktionen	pH, Lf, As	Cr, (ges.), Cu, V, Σ 15EPA PAK	As, Ni, Zn	Σ 16EPA PAK	Sulfat, As, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni, Σ 15EPA PAK Keine Herbizide nachweisbar
GS alle 2 Chargen/Fraktionen	pH, Lf, As	Cu, Σ 15EPA PAK, Diuron, Glyphosat, AMPA	As, Cd, Cr, (ges.), Ni, Hg, Zn, Co	Cu, Zn, Σ 16EPA PAK	Sulfat, As, Cu, Mo, Ni, V, Σ 15EPA PAK, Folgende Herbizide nachweisbar: Atracin, Simazin, Bromacil, Desethylatracin, Diuron, AMPA

3.4 Bewertung der gefundenen Stoffkonzentrationen nach geplanter Mantelverordnung des BMUB (Regierungsentwurf der MantelV, BMUB 2017), Klassifizierung und Ableitung von Verwertungsmöglichkeiten

Die in Kapitel 3 als regelungsrelevant identifizierten Stoffe und Parameter der hier untersuchten nassklassierten Materialfraktionen werden mit den Materialwerten für den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen verglichen, um die nassklassierten Fraktionen den Materialklassen zuzuordnen (Klassifizierung), das Ende der Abfalleigenschaft zu überprüfen und zulässige Einbauweisen nach geplanter MantelV des BMUB abzuleiten. Darauf basierend erfolgt eine Einordnung der Materialien im Hinblick auf die Frage, ob diese im Regelungsbereich der geplanten MantelV verwertet werden können, deponiert werden müssen (im Falle einer Überschreitung der Materialwerte der höchsten, ungünstigsten Verwertungsklassen) oder über die Einbindung nach oder ohne thermische Aufbereitung in Bauprodukte verwertet werden können.

Zuordnung der nassklassierten Fraktionen aus Boden-Bauschutt-Gemischen zu Materialklassen nach EBV

Eluatwerte

Mit den nachfolgenden Graphen wird überprüft, welche Materialwerte im WF 2-Eluat von Bodenmaterialien und Recyclingbaustoffen nach EBV die nassklassierten Boden-Bauschuttgemische einhalten. Es werden lediglich Graphen für Stoffe und Parameter gezeigt, die in Kapitel 3 als regelungsrelevant identifiziert wurden also im Bereich oder über den in Tabelle 1 genannten Materialwerten für BM-0 oder BM-F0* liegen. Alle weiteren Materialwerte aus Tabelle 3 sowie einige Zusatzparameter wurden gemessen, unterschreiten aber deutlich alle Materialwerte (vgl. Kapitel 3). Im CD-ROM-Anhang sind alle Messergebnisse in graphischer und tabellarischer Form dokumentiert.

Abbildung 8 zeigt die einzigen Überschreitungen der BM-0* oder BM-F0*-Materialwerte in WF 2-Eluaten der nassklassierten Sandfraktionen von RBB-3 und RBB-4 für Arsen, Chrom, (ges.) und Kupfer. Die Werte liegen aber deutlich unter RC-1 oder BM-F1.

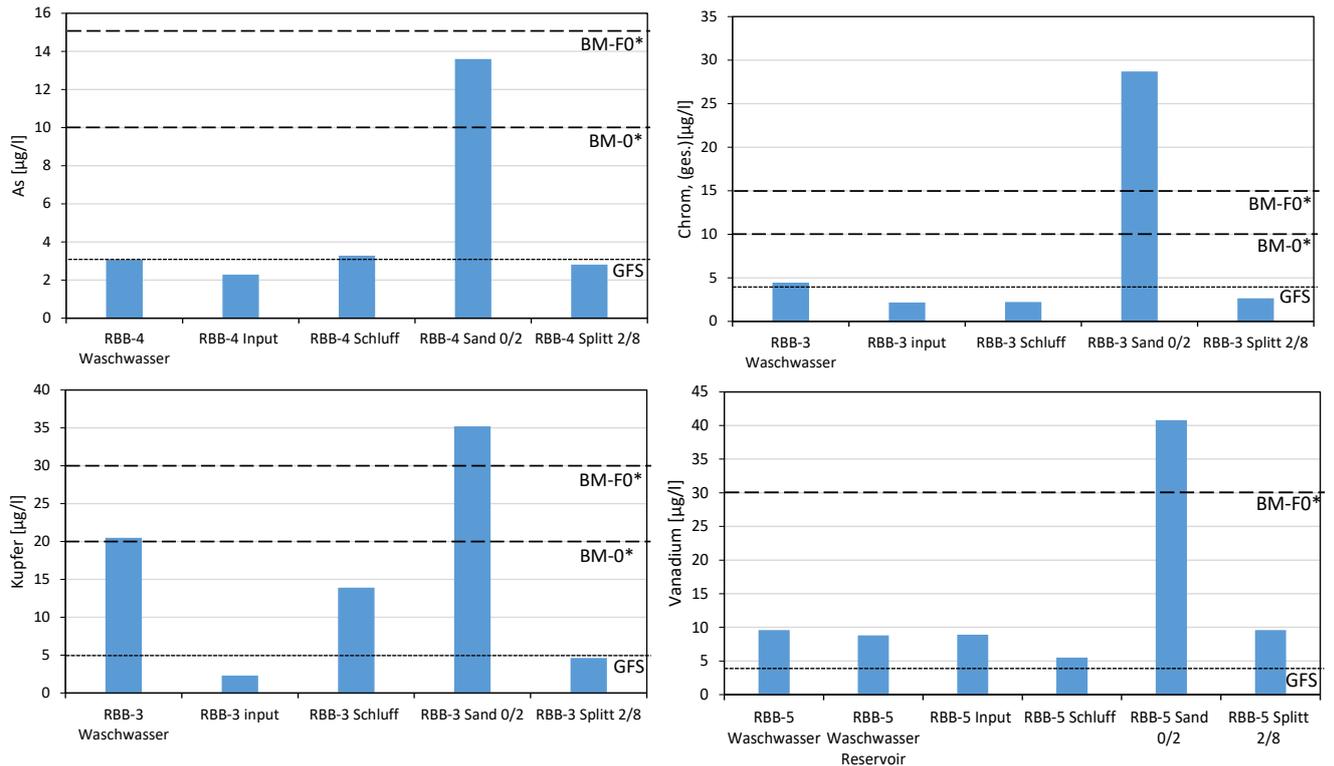


Abbildung 8: Klassifizierung der nassklassierten Fraktionen von RBB nach geplanter EBV: Überschreitungen der BM-F0* von Metallen in WF 2-Eluaten treten nur vereinzelt auf und liegen deutlich unter den BM-F1 und RC-1 Werten.

Wie Abbildung 9 zeigt sind die Konzentrationen der $\Sigma 15$ EPA PAK für die Schluff- und Sandfraktionen verwertungslimitierend. Mit der Ausnahme der nassklassierten Schlufffraktion von RBB 5 mit den höchsten PAK-Austrägen halten aber alle Fraktionen die BM-F 1-Werte ein. Die RC-1-Werte werden immer eingehalten. Splitte weisen keine relevanten PAK-Freisetzen auf.

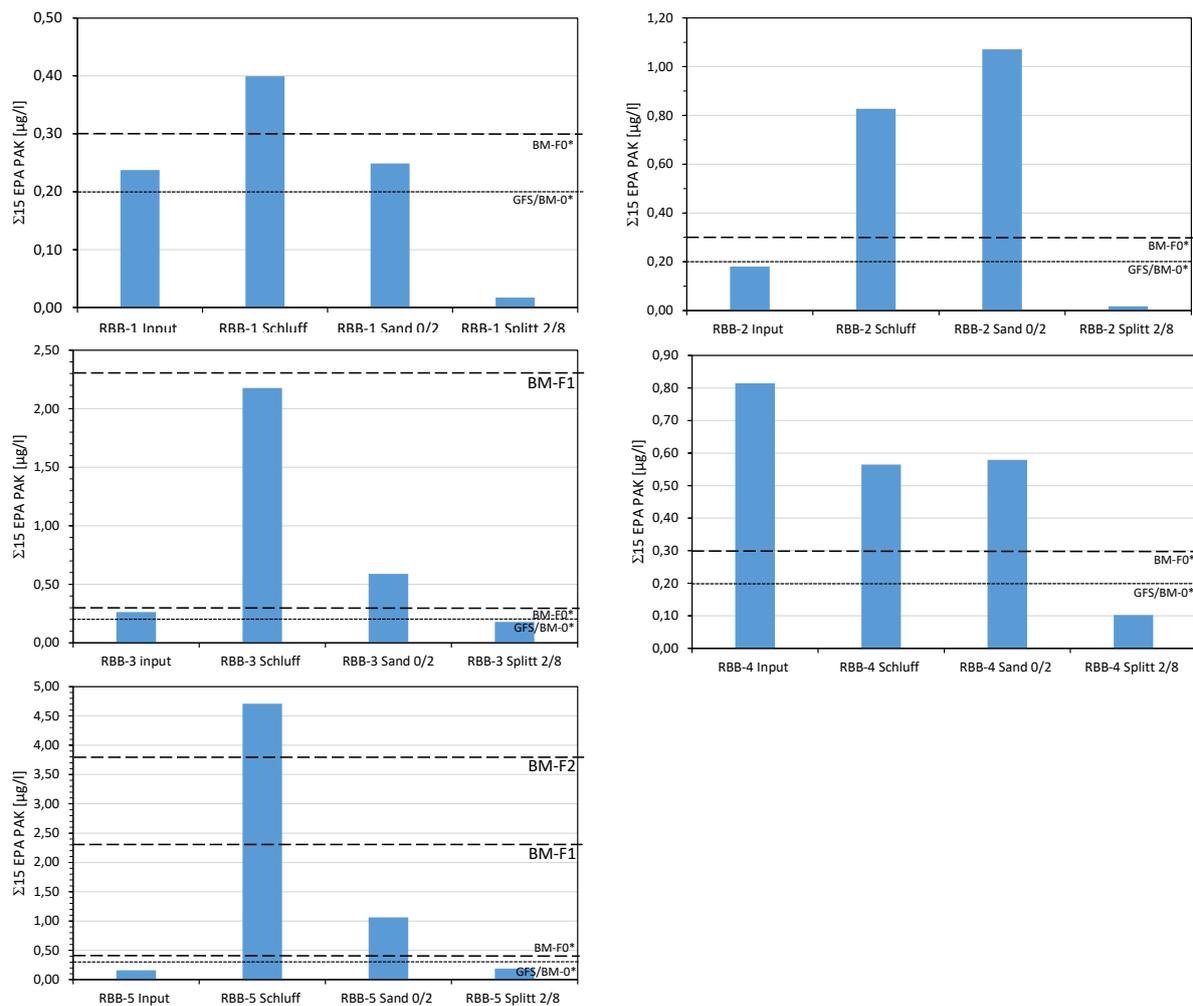


Abbildung 9: Klassifizierung der nassklassierten Fraktionen von RBB nach geplanter EBV, Materialwerte im WF 2-Eluat: Überschreitungen der BM-F0* - Materialwerte für die $\Sigma 15$ EPA PAK treten in WF 2-Eluaten aller nassklassierten Schluff- und Sandfraktionen der RBB 1 bis 5 auf, liegen aber immer deutlich unter RC-1.

Ergebniszusammenfassung Eluate:

- Nassklassierte Sandfraktionen aus Boden-Bauschuttgemischen überschreiten im Einzelfall die BM-F0*-Werte für Arsen, Chrom, (ges.), Kupfer und Vanadium, halten aber immer die BM-F1-Werte ein.
- Keine der Proben überschreitet den Materialwert von Sulfat für BM-F1 (450 mg/l) bzw. RC-1 (600 mg/l) im Eluat, was ein Hinweis auf eine hinreichende Reinigung des Materials im Wasch- und Nassklassierungsprozess ist.
- Keine der Proben überschreitet den Materialwert für die Summe 15 EPA PAK von RC-1 (6 µg/l). Der Materialwert für die Summe 15 EPA PAK von BM-F1 (2,3 µg/l) wird nur im Einzelfall durch eine Schlufffraktion überschritten.

Alle weiteren Materialwerte für BM-F1 bzw. RC-1 werden deutlich unterschritten (Einhaltung von BM-0* im Eluat durch alle Proben der vorliegenden Zeitreihe). Die Parameter pH und Leitfähigkeit sind keine einstufigsrelevanten Materialwerte, sondern dienen nach EBV nur zur Orientierung.

Alleine unter Betrachtung der Eluatgehalte wäre für alle nassklassierten Fraktionen der 5 RBB-Chargen nach den konkretisierten Anforderungen der EBV zu Nr. 4 des § 5 Abs. 1 des KrwG ein Ende der

Abfalleigenschaft in der Materialklasse RC-1 und mit der Ausnahme einer Schlufffraktion (RBB 5) auch in der günstigen Bodenmaterialklasse BM-F1 nach EBV erreicht. Nach den konkretisierten Anforderungen der Nr. 4 des § 5 Abs. 1 sind die hier in Rede stehenden Materialien ausschließlich in technischen Bauwerken vorgesehen. Einige nassklassierte Fraktionen im vorliegenden Projekt sollen als Betonzuschlagsstoff eingesetzt werden (hier wären sogar BM-F3 oder RC-3-Werte zulässig).

Feststoffwerte

Nachfolgende Graphen dienen zur Überprüfung der Einhaltung der Materialwerte im Feststoff von Bodenmaterialien und von RC-Baustoffen der Klassen BM-F1 und RC-1 nach EBV. Wie Tabelle 1 in Kapitel 2 zeigt, existieren für RC-Baustoffe für die regelmäßige Güteüberwachung Materialwerte im Feststoff lediglich für die Summe 16 EPA PAK. Die Überwachungswerte in Anlage 2, Tabelle 2.2 der EBV sind Gegenstand des einmaligen Eignungsnachweises und jeder zweiten Fremdüberwachung und werden dokumentiert. Diese Überwachungswerte entsprechen in der Regel den BM-F0*- und BM-F1-Werten, die hier mit überprüft werden. Im Folgenden werden lediglich Graphen für Stoffe und Parameter im Feststoff gezeigt, die in Kapitel 3 als regelungsrelevant identifiziert wurden also im Bereich oder über den in Tabelle 1 genannten Materialwerten für BM-0 oder BM-F0* liegen. Alle weiteren Materialwerte im Feststoff aus Tabelle 3 und viele Stoffe darüber hinaus wurden gemessen, unterschreiten aber deutlich alle Materialwerte (vgl. Kapitel 3). Im CD-ROM-Anhang sind alle Messergebnisse in graphischer und tabellarischer Form dokumentiert. Wie Tabelle 11 in Kapitel 3 zeigt, sind Arsen, Nickel und Zink im Feststoffgehalt der nassklassierten RBB-Fraktionen zwar bewertungsrelevant aber nicht regelungsrelevant, da sie sämtliche Materialwerte sogar der Materialklasse BM-0* für die Verfüllung von Bodenmaterialien auch mit den Maximalwerten unterschreiten. Diese Stoffe müssen hier nicht weiter untersucht werden. Regelungsrelevant und damit relevant für die Klassifizierung sind dagegen die Feststoffgehalte der $\Sigma 16$ EPA PAK.

Wie Abbildung 10 zeigt, sind die Konzentrationen der $\Sigma 15$ EPA PAK in absteigender Reihenfolge insbesondere für die Schluff- und Sand- teilweise auch für die Splittfraktionen stark verwertungslimitierend. Nassklassierte Splittfraktionen halten bis auf eine geringfügige Überschreitung des BM-F1-Wertes bei RBB 3, die Materialwerte von RC-1 und BM-F1 noch stets ein. Die Sandfraktionen zeigen dagegen noch deutlich erhöhte PAK-Gehalte, die in der Regel noch unterhalb RC-1 liegen, im Einzelfall, wie bei RBB-2, aber die maximal zulässigen Konzentrationen im Verwertungsbereich der EBV überschreiten (> BM-F3 oder RC-3). Die nassklassierten Schlufffraktion liegen oftmals über RC-2 und im Einzelfall, wie bei RBB-2, oberhalb der maximal zulässigen Konzentrationen im Verwertungsbereich der EBV (> BM-F3 oder RC-3).

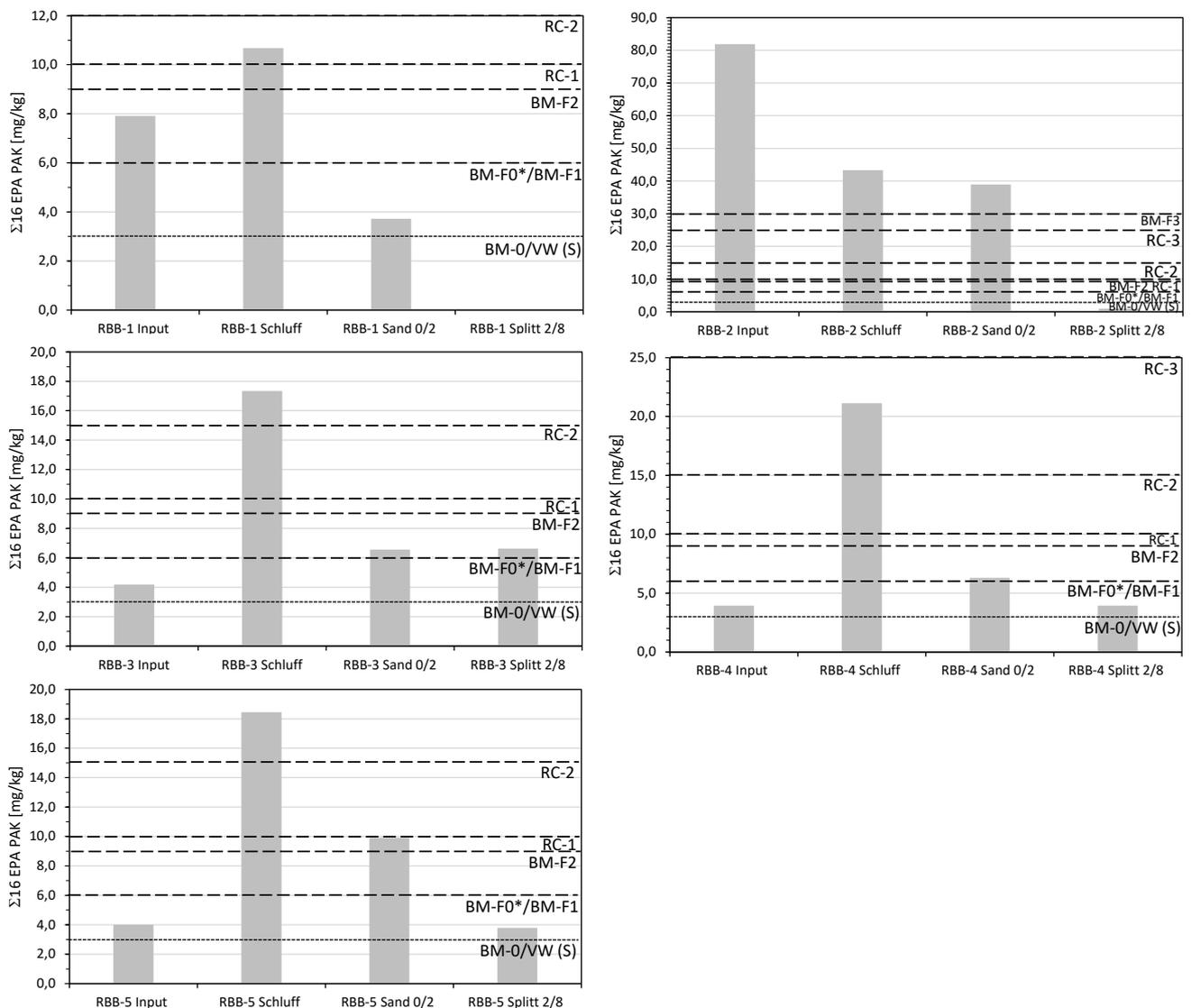


Abbildung 10: Klassifizierung der nassklassierten Fraktionen von RBB nach geplanter EBV, Materialwerte im Feststoffgehalt: Überschreitungen der BM-F0* - Materialwerte für die $\Sigma 15$ EPA PAK treten in WF 2-Eluaten aller nassklassierten Schluff und Sandfraktionen der RBB 1 bis 5 auf, liegen aber immer deutlich unter RC-1.

Ergebniszusammenfassung Feststoffwerte:

- Alle nassklassierten Fraktionen aus Boden-Bauschuttgemischen halten die BM-F0*-Werte für Metalle und Schwermetalle ein.
- Stark verwertungslimitierend sind die Feststoffgehalte der Summe 16 EPA PAK mit steigenden Anreicherungen von Splitt über Sand nach Schluff
 - Nassklassierte Splittfraktionen aus Boden-Bauschuttgemischen übersteigen zwar in der Regel den bodenartspezifischen Vorsorgewert für Sand, halten mit der Ausnahme einer einzelnen geringfügigen Überschreitung, die BM-F0*-Werte für die 16 PAK stets ein.
 - Nassklassierte Sandfraktionen halten in der Regel noch die RC-1 Werte ein. Im Einzelfall treten aber auch in der Sandfraktion noch starke Anreicherungen auf, die sämtliche in der Verwertung noch zulässigen Konzentrationen übersteigen.

- Nassklassierte Schlufffraktionen weisen stark PAK-Anreicherungen auf, die regelmäßig oberhalb der RC-2-Werte liegen. Im Einzelfall treten aber auch in der Sandfraktion noch starke Anreicherungen auf, die sämtliche in der Verwertung noch zulässigen Konzentrationen übersteigen.

Alle weiteren Materialwerte für BM-F1 bzw. RC-1 werden deutlich unterschritten (Einhaltung von BM-0* im Feststoff durch alle Proben der vorliegenden Zeitreihe). Alleine unter Betrachtung der Feststoffgehalte wäre für alle nassklassierten Splittfraktionen der 5 RBB-Chargen nach den konkretisierten Anforderungen der EBV zu Nr. 4 des § 5 Abs. 1 des KrwG ein Ende der Abfalleigenschaft in der Materialklasse RC-1 und mit der Ausnahme einer geringfügigen Überschreitung (RBB 3) auch in der günstigen Bodenmaterialklasse BM-F1 nach EBV erreicht.

Für nassklassierte Sandfraktionen der 5 RBB-Chargen wäre nach den konkretisierten Anforderungen der EBV zu Nr. 4 des § 5 Abs. 1 des KrwG ein Ende der Abfalleigenschaft in der Materialklasse RC-1 nach EBV in der Regel erreicht. Im Einzelfall zeigen sich aber starke PAK-Anreicherungen oberhalb der RC-3 Werte. Für nassklassierte Sandfraktionen müssten in der Praxis die PAK-Gehalte sehr genau kontrolliert und überwacht werden. Ob eine kontinuierliche Herstellung von Sandfraktionen mit moderaten PAK-Gehalten im Bereich RC-1 und damit ein Ende der Abfalleigenschaft erreichbar ist, kann hier nicht abschließend beurteilt werden. Hierfür müssten weitere kontinuierliche Untersuchungsdaten im Rahmen einer Güteüberwachung gewonnen werden.

Für nassklassierte Schlufffraktionen sind starke PAK-Anreicherungen nachweisbar, die eine Verwertung im Regelungsbereich der EBV in Frage stellen. Im Einzelfall treten enorme PAK-Potentiale auf, so dass über eine Deponierung oder thermische Verwertung nachgedacht werden sollte.

Zuordnung der nassklassierten Fraktionen aus Gleisschotter zu Materialklassen nach EBV

Eluatwerte

Mit den nachfolgenden Graphen wird überprüft, welche Materialwerte im WF 2-Eluat von Bodenmaterialien und Gleisschotter nach EBV die nassklassierten Gleisschotter einhalten. Es werden lediglich Graphen für Stoffe und Parameter gezeigt, die in Kapitel 3 als regelungsrelevant identifiziert wurden, also im Bereich oder über den in Tabelle genannten Materialwerten für BM-0, BM-F0* oder GS-0 liegen. Alle weiteren Materialwerte aus Tabelle 3 und viele Stoffe darüber hinaus wurden gemessen, unterschreiten aber deutlich alle Materialwerte (vgl. Kapitel 3). Im CD-ROM-Anhang sind alle Messergebnisse in graphischer und tabellarischer Form dokumentiert.

Abbildung 11 zeigt die einzige Überschreitung der BM-0*, BM-F0*-Materialwerte in WF 2-Eluaten der nassklassierten Schlufffraktion von GS-2 durch Kupfer. Der Werte liegt aber deutlich unter BM-F1.

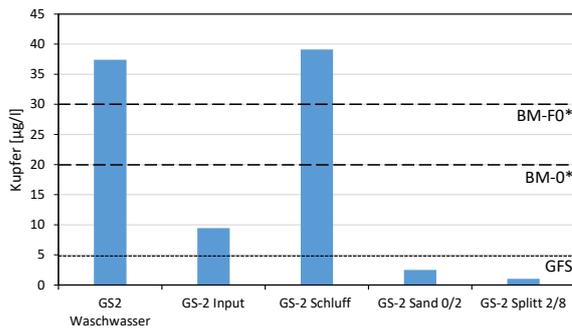


Abbildung 11: Klassifizierung der nassklassierten Fraktionen von GS nach geplanter EBV: Nur eine einzelne Überschreitung des BM-0*- oder BM-F0*-Wertes von Kupfer im WF 2-Eluat von GS-2.

Wie Abbildung 12 zeigt können die Konzentrationen der $\Sigma 15$ EPA PAK für die Schluff- und Sandfraktionen verwertungslimitierend sein. Nassklassierte Sand- und Splittfraktionen halten die Materialwerte der günstigen Materialklassen GS-1 und BM-F1 stets ein. Nassklassierte Schlufffraktionen können im Bereich von GS-2 und BM-F 3 liegen.

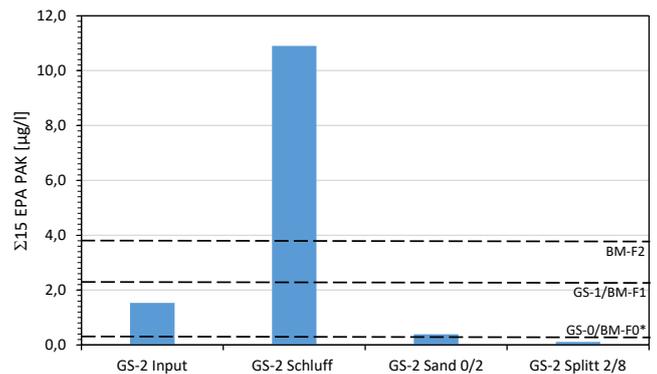
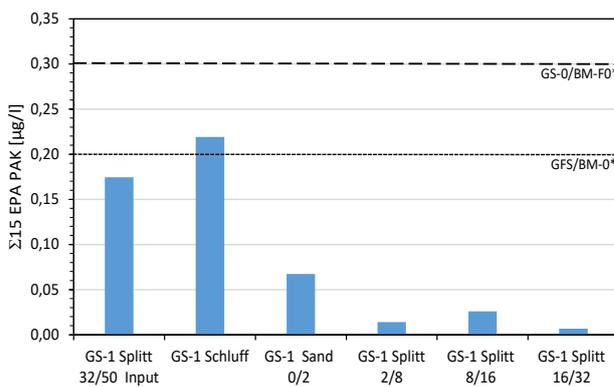


Abbildung 12: Klassifizierung der nassklassierten Fraktionen von GS nach geplanter EBV, Materialwerte im WF 2-Eluat: Überschreitungen der BM-F0* - Materialwerte für die $\Sigma 15$ EPA PAK treten in WF 2-Eluaten aller nassklassierten Schluff und Sandfraktionen der RBB 1 bis 5 auf, liegen aber immer deutlich unter RC-1.

Wie Abbildung 13 zeigt können die Konzentrationen der Herbizide Diuron, Glyphosat und AMPA für die Schluff- und Sandfraktionen verwertungslimitierend sein. Nassklassierte Splittfraktionen halten die Materialwerte der günstigen Materialklassen GS-1 stets ein. Nassklassierte Sand- und Schlufffraktionen können im Bereich von GS-2 liegen.

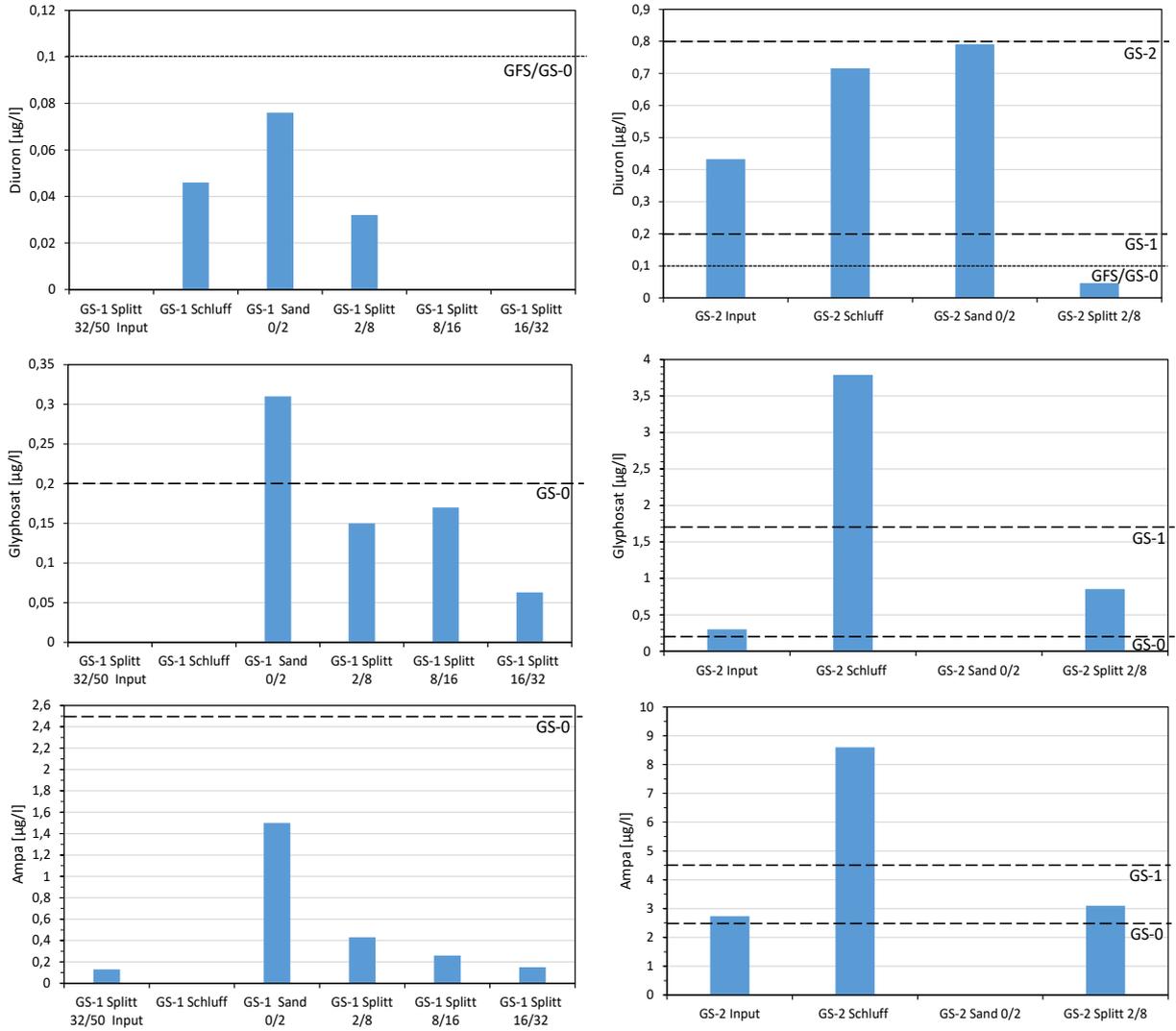


Abbildung 13: Klassifizierung der nassklassierten Fraktionen von GS nach geplanter EBV, Materialwerte im WF 2-Eluat: Überschreitungen der GS-1 - Materialwerte für die Herbizide Diuron, Glyphosat und AMPA treten insbesondere in WF 2-Eluaten der nassklassierten Schluff- und Sandfraktionen der Gleisschotter auf. Nassklassierte Splittfraktionen liegen immer deutlich unter GS-1.

Ergebniszusammenfassung für die hier untersuchten Eluate:

- Nassklassierte Schlufffraktionen aus Gleisschotter überschreiten nur in einem Einzelfall den BM-F0*-Wert für Kupfer, halten aber immer die BM-F1-Werte ein.
- Nassklassierte Schlufffraktionen aus Gleisschotter können den Materialwert für die Summe 15 EPA PAK von GS-1 und BM-F2 deutlich überschreiten liegen aber noch unterhalb GS-2.
- Nassklassierte Sand- und Splittfraktionen aus Gleisschotter halten den Materialwert für die Summe 15 EPA PAK von GS-1 stets ein
- Insbesondere nassklassierte Schlufffraktionen, im Einzelfall auch Sandfraktionen aus Gleisschotter überschreiten die Materialwerte von GS-1 für Diuron, Glyphosat und AMPA und liegen im Bereich von GS-2
- Nassklassierte Splittfraktionen aus Gleisschotter halten die Materialwerte von GS-1 für Diuron, Glyphosat und AMPA stets ein.

Alle weiteren Materialwerte für BM-F0* bzw. GS-0 werden deutlich unterschritten (Einhaltung von BM-0* im Eluat durch alle Proben der vorliegenden Zeitreihe). Die Parameter pH und Leitfähigkeit sind keine einstufigsrelevanten Materialwerte, sondern dienen nach EBV nur zur Orientierung.

Alleine unter Betrachtung der Eluatgehalte wäre für die hier untersuchten nassklassierten Splittfraktionen der 2 GS-Chargen nach den konkretisierten Anforderungen der EBV zu Nr. 4 des § 5 Abs. 1 des KrWG ein Ende der Abfalleigenschaft in der Materialklasse GS-1 nach EBV erreicht. Schluff- und Sandfraktionen liegen im Bereich von GS-2.

Feststoffwerte

Nachfolgende Graphen dienen zur Überprüfung der Einhaltung der Materialwerte im Feststoff von Bodenmaterialien der Klasse BM-F1 nach EBV (für Gleisschotter existieren keine Materialwerte im Feststoff. Im Folgenden werden lediglich Graphen für Stoffe und Parameter im Feststoff gezeigt, die in Kapitel 3 als regelungsrelevant identifiziert wurden also im Bereich oder über den in Tabelle 1 genannten Materialwerten für BM-0 oder BM-F0* liegen. Alle weiteren Materialwerte im Feststoff aus Tabelle 3 und viele Stoffe darüber hinaus wurden gemessen, unterschreiten aber deutlich alle Materialwerte (vgl. Kapitel 3). Im CD-ROM-Anhang sind alle Messergebnisse in graphischer und tabellarischer Form dokumentiert. Wie Tabelle 18 in Kapitel 3 zeigt, sind Arsen, Cadmium, Chrom, (ges.), Nickel, Quecksilber und Kobalt im Feststoffgehalt der nassklassierten RBB-Fraktionen zwar bewertungsrelevant aber nicht regelungsrelevant, da sie sämtliche Materialwerte sogar der Materialklasse BM-0* für die Verfüllung von Bodenmaterialien auch mit den Maximalwerten unterschreiten. Diese Stoffe müssen hier nicht weiter untersucht werden. Regelungsrelevant und damit relevant für die Klassifizierung sind dagegen die Feststoffgehalte der Σ 16 EPA PAK.

Wie Abbildung 14 zeigt, sind die Konzentrationen der Σ 16 EPA PAK in für die Schluff- und teilweise auch für die Sandfraktionen stark verwertungslimitierend. Nassklassierte Splittfraktionen halten bis alle Grenzwerte ein. Die Sandfraktionen zeigen dagegen einen leicht erhöhten Wert in der Probe GS-1 sowie eine deutliche Überschreitung der BM-F3 Werte bei Probe GS-2. Die PAK-Gehalte der nassklassierten Schlufffraktion liegen erwartungsgemäß hoch und überschreiten dabei die maximal zulässige Konzentration im Verwertungsbereich der EBV (> BM-F3 oder RC-3).

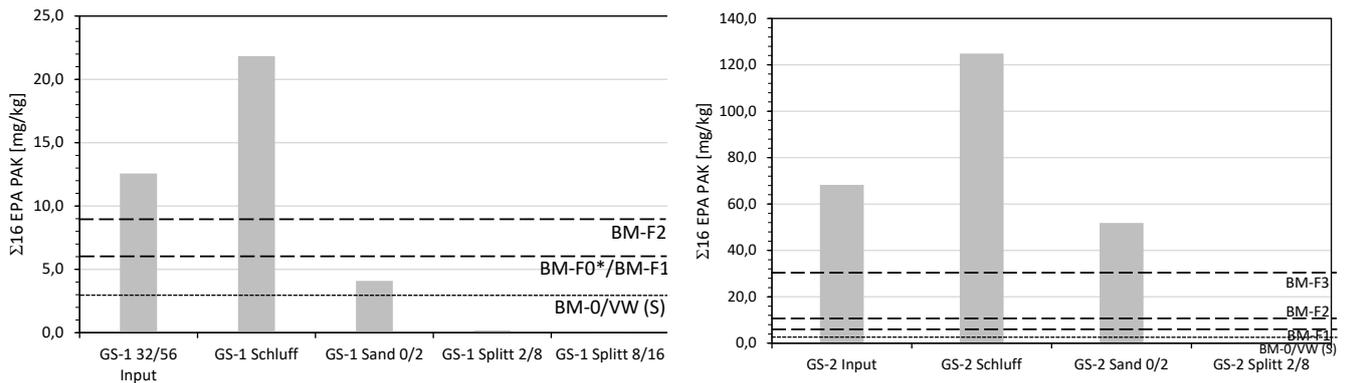


Abbildung 14: Klassifizierung der nassklassierten Fraktionen von GS nach geplanter EBV, Materialwerte im Feststoffgehalt: Überschreitungen der BM-F2 und BM-F3 - Materialwerte für die Σ15 EPA PAK treten im Feststoff aller nassklassierten Schluff und Sandfraktionen der GS 1 bis 2 auf.

Teilprojekt des ZAG Tübingen: Ergebnisse II: Klassifizierung der nassklassierten Fraktionen, Prüfung Ende Abfalleigenschaft, Ableitung von Verwertungsmöglichkeiten

Es wurde graphisch überprüft, welche Materialwerte im WF 2-Eluat und im Feststoff von Bodenmaterialien und Recyclingbaustoffen nach EBV durch die nassklassierten Boden-Bauschuttgemische eingehalten werden. Selbiges wurde für die Gleisschotter unter zusätzlicher Heranziehung der Materialwerte für Gleisschotter durchgeführt. Darauf basierend wurden die Materialfraktionen klassifiziert, die limitierenden Stoffe und Parameter bestimmt, das Ende der Abfalleigenschaft überprüft und die Verwertungsmöglichkeiten abgeleitet. Tabelle 21 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

Tabelle 22: Zusammenfassende Übersicht zur Klassifizierung der nassklassierten Materialfraktionen, Klassifizierung, Bestimmung der verwertungslimitierenden Stoffe und Parameter, Ende der Abfalleigenschaft, und zu den Verwertungsmöglichkeiten

Material/Fraktion	Materialklasse	Limitierende Stoffe/Parameter	Ende der Abfalleigenschaft (bis BM-F1, Rc-1, GS-1) *	Zulässige Einbauweisen (EBV) andere Verwertungsmöglichkeiten
RBB/Schluff	BM-F2/RC-3 im Einzelfall > DK 1	Σ15 EPA PAK (Eluat) Σ16 EPA PAK (Feststoff)	nein	Zum Teil geschlossene Bauweisen mit technischen Sicherungsmaßnahmen nach EBV, eher Deponierung DK 1 und höher oder Einbindung in Produkte nach thermischer Aufbereitung
RBB/Sand 0/2	BM-F1/RC-1	Σ15 EPA PAK (Eluat) Σ16 EPA PAK (Feststoff), nachgeordnet As, Cr, (ges.), Cu, V	ja	Vielfältige offene und teildurchströmte technische Einbauweisen nach EBV, kein Einbau im ungünstigen Fall, keine Verfüllung, vielfältige weitere Verwendungen in Bauprodukten
RBB/Splitte	BM-F0*/RC-1		ja	In offenen technischen Einbauweisen nach EBV einsetzbar, Einbau im ungünstigen Fall je nach PAK-Konzentration, keine Verfüllung, vielfältige weitere Verwendungen in Bauprodukten

GS/Schluff	GS-2/BM-F3/ > DK 1	Σ 15 EPA PAK (Eluat), Diuron, Glyphosat, AMPA, Σ 16 EPA PAK (Feststoff)	nein	Zum Teil geschlossene Bauweisen mit technischen Sicherungsmaßnahmen nach EBV, eher Deponierung DK 1 und höher oder Einbindung in Produkte nach thermischer Aufbereitung
GS/Sand	GS-1/GS-2/ im Einzelfall > DK 1	Diuron, Σ 16 EPA PAK (Feststoff)	Eher nein, nur im Einzelfall, PAK im Feststoff genau zu prüfen	Nur im Einzelfall in offenen technischen Einbauweisen nach EBV einsetzbar, kein Einbau im ungünstigen Fall, keine Verfüllung, vielfältige weitere Verwendungen in Bauprodukten
GS/Splitt	GS-1	Diuron, AMPA	ja	Vielfältige offene und teildurchströmte technische Einbauweisen nach EBV, kein Einbau im ungünstigen Fall, keine Verfüllung, vielfältige weitere Verwendungen in Bauprodukten

4. Verwertungsoptionen

4.1 Erscheinungsbild der Schluffe und Sande

Die getrockneten Schluffe und Sande aus der Gleisschotteraufbereitung (Abbildung 15 bis Abbildung 18) sind tendenziell dunkler als die Materialien aus der Aufbereitung der Boden-Bauschutt-Gemische (Abbildung 19 bis Abbildung 22). Grund ist, dass Gleisschotter i. d. R. aus dunklen Hartgesteinen wie Basalt, Diabas, Granit oder Grauwacke hergestellt wird. Die Sande aus der Aufbereitung der Boden-Bauschutt-Gemische bestehen augenscheinlich überwiegend aus natürlichen Gesteinskörnungen. Neben ungebrochenen Sandkörnern treten gebrochene Partikel auf, die auf den Kalkstein im Aufgabematerial zurückgehen.



Abbildung 15: Aufgabematerial Gleisschotter: Getrockneter Schluff (Probe 17642)



Abbildung 16: Aufgabematerial Gleisschotter: Getrockneter Schluff (Probe 17643)



Abbildung 17: Aufgabematerial Gleisschotter: Sande (Probe 17646)



Abbildung 18: Aufgabematerial Gleisschotter: Sande (Probe 18509)



Abbildung 19: Aufgabematerial Boden-Bauschutt-Gemisch: Getrockneter Schluff (Probe 17640)

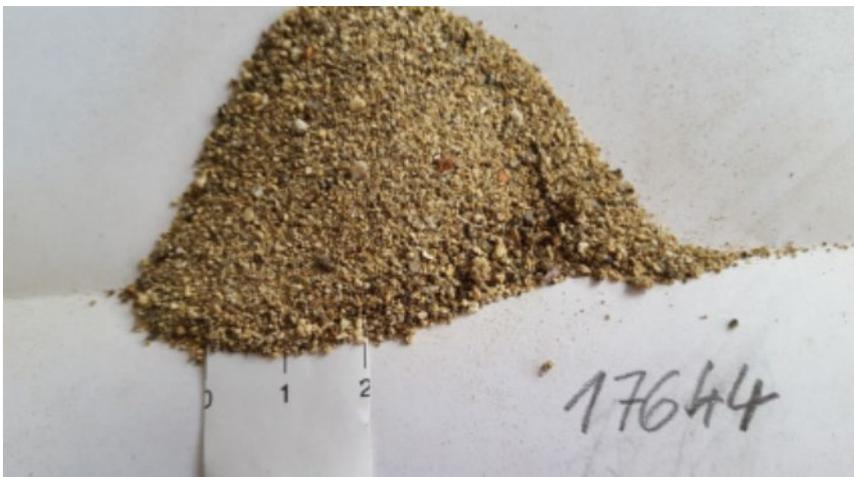


Abbildung 20: Aufgabematerial Boden-Bauschutt-Gemisch: Sande (Probe 17644)



Abbildung 21: Aufgabematerial Boden-Bauschutt-Gemisch: Sande (Probe 17645)



Abbildung 22: Aufgabematerial Boden-Bauschutt-Gemisch: Sande (Probe 18514)

4.2 Physikalische Parameter

Die Feuchten der Proben nehmen in der Reihenfolge Schluff > Sand > Inputmaterial > Splitt ab. Der Schluff hat im Anlieferungszustand einen Feuchtegehalt von über 50 Masse-%. Tendenziell sind die Feuchtegehalte aller Fraktionen des Gleisschotterers etwas geringer als die der Boden-Bauschutt-Gemische.

Aus den Partikelgrößenverteilungen können u. a. die Partikelgrößen, bei denen bestimmte Durchgangswerte erreicht werden, abgelesen werden. Die Partikelgröße x_{90} , bei der ein Durchgang von 90 Masse-% vorliegt und die näherungsweise der maximalen Partikelgröße entspricht, ist für den Schluff und den Sand dargestellt (Abbildung 23 und Abbildung 24). Der Schluff weist eine hohe Feinheit auf, woraus sich der hohe Feuchtegehalt ergibt. Die x_{90} -Werte liegen unter 60 μm . Als Vergleichswert kann die Feinheit eines Rohmehl für die Zementherstellung herangezogen werden. Hier sollte die maximale Partikelgröße von 100 μm nicht überschritten werden. Die Feinheit, die für Ziegelrohstoffe erforderlich ist, ist in der Regel noch höher. Angaben für Hochlochziegel liegen bei maximal 60 % > 20 μm bzw. in anderen Quellen bei maximal 20 % > 63 μm [1, 2].

Der Sand weist x_{90} -Werte um 2 mm bei den Boden-Bauschutt-Gemischen bzw. um 1 mm bei dem Gleisschotter auf. Der aus den Boden-Bauschutt-Gemischen abgetrennte Sand entspricht eher einem Grobsand, während der Sand aus dem Gleisschotter einem Feinsand entspricht.

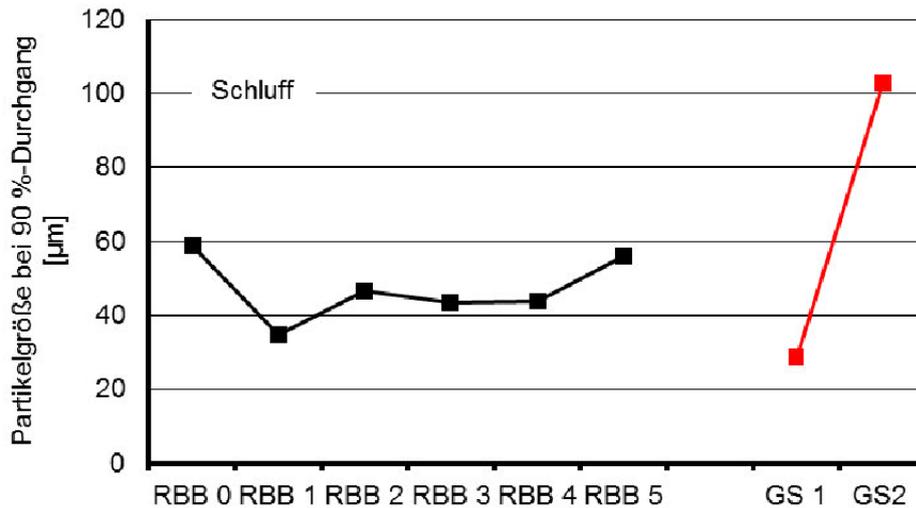


Abbildung 23: Partikelgröße x_{90} für die Schluffe aus der Aufbereitung der Boden-Bauschutt-Gemische bzw. den Gleisschottern

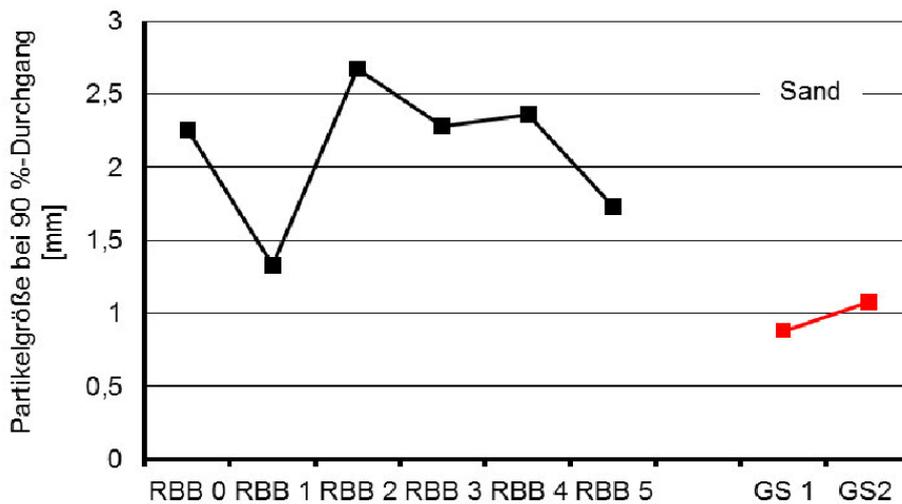


Abbildung 24: Partikelgröße x_{90} für die Sande aus der Aufbereitung der Boden-Bauschutt-Gemische bzw. den Gleisschottern

Die Sieblinien der Splitte wurden für die Boden-Bauschutt-Gemische untersucht. Es liegt eine sehr enge Verteilung vor (Abbildung 25). Mit der Siebungsmaschine, die dem Schwertwäscher nachgeschaltet ist, können also scharfe Trennschnitte realisiert werden. Die Gegenüberstellung mit dem Sollsieblinienbereich, den die Rezyklate der Firma FEESSE einhalten müssen und der aus Güteüberwachungsprotokollen entnommen wurde, zeigt, dass der Sandanteil zu gering ist. Eine Zumischung der Sande aus der Anlage von etwa 20 % wäre denkbar, um die vorgegebene Verteilung einzuhalten.

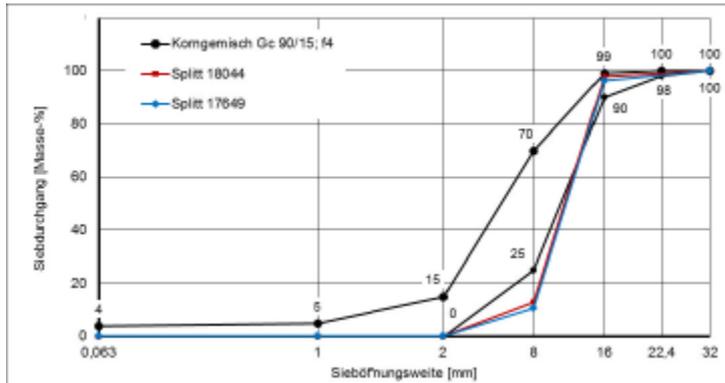


Abbildung 25: Partikelgrößenverteilung der Splitte aus der Aufbereitung der Boden-Bauschuttgemische

Die Reindichten der Sande sowohl aus der Boden-Bauschutt-Aufbereitung als auch aus der Gleisschotteraufbereitung liegen zwischen 2,68 und 2,78 g/cm³. Diese vergleichsweise hohen Werte resultieren aus den calcitischen Bestandteilen bzw. den Anteilen an Hartgesteinen des Materials. Die enge Schwankungsbreite weist darauf hin, dass ähnliche mineralogische Zusammensetzungen vorliegen. Die Rohdichte beträgt im Mittel 2,47 g/cm³ und ist damit im Vergleich zu sortenreinen Betonkörnungen > 4 mm, für die in [3] eine Spannweite von 2,14 bis 2,67 g/cm³ angegeben wird, ebenfalls relativ hoch. Das stimmt mit der Bewertung anhand des optischen Erscheinungsbilds überein, wonach natürliche Gesteinskörnungen überwiegen.

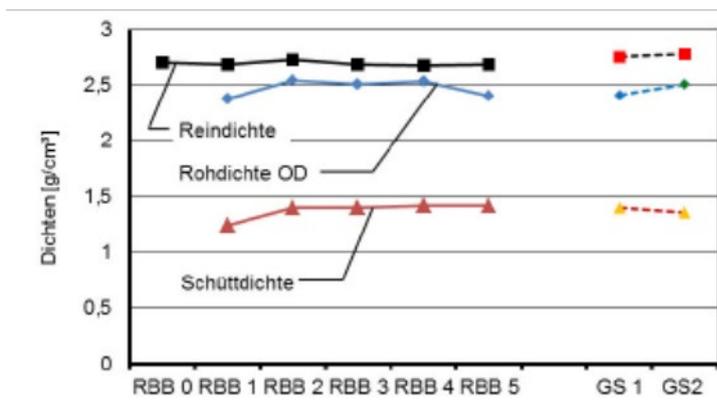


Abbildung 26: Dichten der Sande aus der Aufbereitung der Bauschutt-Boden-Gemische

Die Wasseraufnahme der Sande ist mit 1,1 bis 2,3 Masse-% sehr niedrig. Ursache ist das tatsächliche Vorliegen dichter Körnungen, was aus dem Erscheinungsbild der Sand gefolgert werden kann. Bei der Messung der Wasseraufnahme von Sanden können allerdings auch Messfehler nicht ausgeschlossen werden.

4.3 Chemische und mineralogische Parameter

Die chemische Zusammensetzung der Aufbereitungsprodukte der Gleisschotter weist aus, dass in allen Proben das SiO₂ gegenüber dem CaO dominiert. Die Sande bzw. Schluffe aus der ersten Probenahme sind im Vergleich zur zweiten Probenahme etwas SiO₂-ärmer und CaO-reicher (Tabelle 23).

Tabelle 23: Chemische Zusammensetzung von Schluff und Sand aus der Aufbereitung von Gleisschotter

	Probe	Ma.-%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	GV 1025°C
			Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%
Gleisschotter GS 1	Schluff	17642	32,1	9,9	9,4	18,7	5,4	2,7	0,5	0,2	0,7	0,1	0,3	20,0
		17643	32,2	10,0	9,2	18,5	5,5	2,7	0,5	0,2	0,7	0,1	0,3	20,0
		Mittel	32,1	9,9	9,3	18,6	5,5	2,7	0,5	0,2	0,7	0,1	0,3	20,0
	Sand	17646	48,2	8,7	6,7	16,0	3,6	2,2	1,1	0,3	0,7	0,1	0,2	12,2
		17647	42,7	8,8	5,6	20,7	3,4	2,1	1,1	0,3	0,7	0,1	0,2	14,3
	Mittel	45,4	8,7	6,2	18,3	3,5	2,1	1,1	0,3	0,7	0,1	0,2	13,2	
Gleisschotter GS 2	Schluff	18510	47,8	11,2	8,9	10,8	3,0	2,7	1,0	0,3	0,6	0,1	0,3	13,2
		18511	47,6	11,0	8,8	10,7	3,5	2,6	1,1	0,3	0,6	0,1	0,3	13,4
		Mittel	47,7	11,1	8,8	10,7	3,2	2,7	1,0	0,3	0,6	0,1	0,3	13,3
	Sand	18508	64,2	10,9	8,4	5,2	2,1	2,2	1,8	0,2	0,5	0,1	0,2	4,1
		18509	64,1	10,7	8,3	5,6	2,0	2,3	1,5	0,1	0,5	0,1	0,2	4,5
	Mittel	64,2	10,8	8,4	5,4	2,0	2,3	1,7	0,1	0,5	0,1	0,2	4,3	

Anhand des gemessenen CaO-Gehaltes und des Glühverlustes ist eine vereinfachte Abschätzung des CaCO₃-Gehaltes möglich. Bei Werten, für die (CaCO₃) aus GV > (CaCO₃) aus CaO gilt, stammt der „überschüssige“ Glühverlust aus anderen Carbonaten bzw. flüchtigen Bestandteilen. Nach Abbildung 27 kann von einem Gehalt an Calciumcarbonat zwischen 10 und 30 % ausgegangen werden.

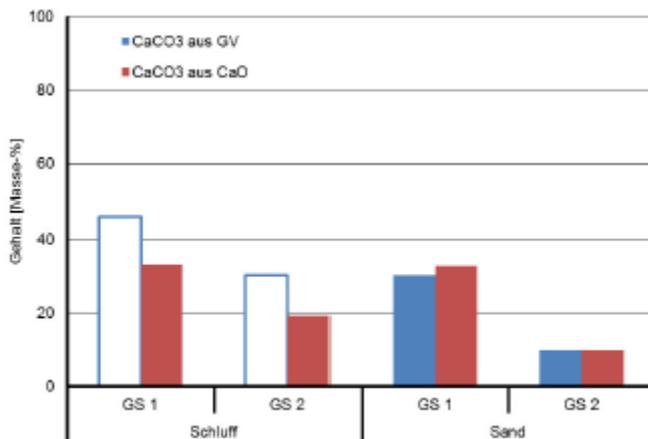


Abbildung 27: Berechnete CaCO₃-Gehalte der Produkte aus der Aufbereitung des Gleisschotters

Im Input der Boden-Bauschutt-Aufbereitung der Probenahmen 1 bis 3 dominiert im Unterschied zu den Gleisschottern das CaO gegenüber dem SiO₂ (Tabelle 24). Es handelt sich also um kalksteinreiche Materialien. Die Probenahmen 4 und 5 sind dagegen SiO₂-reicher. Anhand des berechneten CaCO₃-Gehaltes kann festgestellt werden, dass das eingesetzte Material einen hohen Anteil an Kalkstein aufweist (Abbildung 28). Bei den Aufbereitungsprodukten besteht die Tendenz, dass der Kalksteinanteil in der Reihenfolge Schluff – Sand – Splitt zunimmt. Die Schluffe lassen sich in etwa in die Kategorie der „Mergelsteine“ einordnen.

Die Splitte entsprechen in etwa einem mergeligen Kalkstein. Bei den zusätzlich zur Untersuchung übergebenen Proben ist der Betonsand naturgemäß CaO-reicher. Die Proben, die vom Absieb bzw. RC-Vorsieb entnommen wurden, unterscheiden sich deutlich. Unter anderem ist ihr SiO₂-Gehalt höher als der der Proben der Boden-Bauschutt-Gemische.

Tabelle 24: Chemische Zusammensetzung von Schluff und Sand aus der Aufbereitung von Boden-Bauschutt-Gemischen

		Probe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	GV 1025°C	
			Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	
Boden- Bauschutt- Gemisch 0	Schluff	17293	38,16	11,78	4,54	20,98	1,37	1,65		0,58	0,63		0,32	20,00	
	Sand	17447	57,08	7,16	3,78	16,71	1,22	1,46		0,31	0,34			11,94	
Boden- Bauschutt- Gemisch 1 RBB 1	Input	17638	9,00	2,92	2,79	47,60	0,69	0,52	0,10	0,14	0,19	0,07	0,17	35,79	
		17639	11,20	2,92	2,44	47,24	0,69	0,54	0,09	0,12	0,18	0,07	0,10	34,41	
		Mittel	10,10	2,92	2,62	47,42	0,69	0,53	0,09	0,13	0,18	0,07	0,14	35,10	
	Schluff	17640	26,90	10,15	5,61	28,82	1,36	1,77	0,15	0,23	0,67	0,11	0,24	23,97	
		17641	26,82	10,36	5,62	28,60	1,36	1,81	0,17	0,25	0,66	0,12	0,25	23,97	
		Mittel	26,86	10,25	5,62	28,71	1,36	1,79	0,16	0,24	0,67	0,11	0,25	23,97	
	Sand	17644	25,23	3,20	3,21	40,31	1,14	0,83	0,30	0,34	0,17	0,07	0,12	25,04	
		17645	25,76	3,18	3,01	39,28	1,18	0,89	0,25	0,30	0,19	0,07	0,11	25,76	
		Mittel	25,49	3,19	3,11	39,79	1,16	0,86	0,28	0,32	0,18	0,07	0,11	25,40	
	Splitt	17648	3,66	0,76	0,89	53,55	0,44	0,18	0,04	0,08	0,06	0,05	0,08	40,20	
		17649	4,12	0,90	0,82	53,21	0,46	0,21	0,05	0,10	0,05	0,05	0,04	39,99	
		Mittel	3,89	0,83	0,85	53,38	0,45	0,19	0,04	0,09	0,06	0,05	0,06	40,10	
Boden- Bauschutt- Gemisch 2 RBB 2	Input	18036	28,84	6,03	3,00	33,57	2,01	2,07	0,30	0,35	0,34	0,06	0,12		
		18037	nicht gemessen												
		Mittel	28,84	6,03	3,00	33,57	2,01	2,07	0,30	0,35	0,34	0,06	0,12	23,29	
	Schluff	18038	37,17	11,94	6,49	18,56	3,50	2,99	0,29	0,56	0,70	0,12	0,23	17,43	
		18039	37,44	11,27	6,19	19,28	3,30	2,93	0,31	0,45	0,68	0,12	0,22	17,78	
		Mittel	37,31	11,60	6,34	18,92	3,40	2,96	0,30	0,50	0,69	0,12	0,22	17,61	
	Sand	18040	13,58	2,35	6,70	44,83	0,85	0,61	0,16	0,23	0,20	0,09	0,21	30,17	
		18041	14,32	2,43	6,66	45,40	0,82	0,63	0,16	0,23	0,17	0,09	0,16	28,91	
		Mittel	13,95	2,39	6,68	45,12	0,84	0,62	0,16	0,23	0,19	0,09	0,18	29,54	
	Splitt	18044	13,38	2,15	1,51	48,87	1,83	0,76	0,09	0,16	0,13	0,05	0,07	31,00	
		18045	18,68	2,76	1,66	46,05	1,37	0,99	0,36	0,22	0,15	0,06	0,08	27,57	
		Mittel	16,03	2,45	1,59	47,46	1,60	0,88	0,22	0,19	0,14	0,06	0,07	29,28	
Boden- Bauschutt- Gemisch 3 RBB 3	Input	18319	mit GV	18,95	3,21	1,62	43,66	1,32	0,99	0,15	0,12	0,16	0,06	0,09	29,67
		18320	nicht gemessen												
		Mittel	18,95	3,21	1,62	43,66	1,32	0,99	0,15	0,12	0,16	0,06	0,09	29,67	
	Schluff	18315	mit GV	37,15	12,00	5,89	20,87	1,66	2,34	0,41	0,54	0,70	0,14	0,29	17,95
		18316	mit GV	38,19	12,23	5,77	19,96	1,67	2,30	0,38	0,38	0,68	0,13	0,29	17,99
		Mittel	37,67	12,12	5,83	20,42	1,67	2,32	0,39	0,46	0,69	0,14	0,29	17,97	
	Sand	18317	mit GV	32,97	4,95	3,38	33,31	1,03	1,40	0,44	0,42	0,27	0,09	0,17	21,53
		18318	nicht gemessen												
		Mittel	32,97	4,95	3,38	33,31	1,03	1,40	0,44	0,42	0,27	0,09	0,17	21,53	
	Splitt		keine Probe												

	Probe		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	GV 1025°C		
			Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%		
Boden- Bauschutt- Gemisch 4 RBB 4	Input	18313	mit GV	54,05	11,53	2,83	14,29	0,85	4,85	1,19	0,12	0,20	0,08	0,14	9,86	
		18314	nicht gemessen													
		Mittel		54,05	11,53	2,83	14,29	0,85	4,85	1,19	0,12	0,20	0,08	0,14	9,86	
	Schluff	18309	mit GV	39,35	11,28	5,65	20,34	1,86	2,56	0,66	0,34	0,64	0,14	0,28	16,84	
		18310	mit GV	39,71	11,39	5,64	19,92	1,94	2,54	0,63	0,26	0,61	0,14	0,28	16,92	
		Mittel		39,53	11,33	5,65	20,13	1,90	2,55	0,64	0,30	0,63	0,14	0,28	16,88	
	Sand	18311	mit GV	37,18	6,53	3,27	29,77	1,05	2,33	0,88	0,18	0,26	0,11	0,12	18,29	
		18312	nicht gemessen													
		Mittel		37,18	6,53	3,27	29,77	1,05	2,33	0,88	0,18	0,26	0,11	0,12	18,29	
	Spült		keine Probe													
Boden- Bauschutt- Gemisch 5 RBB 5	Input		keine Probe													
		Schluff	18516	mit GV	47,26	10,79	4,66	14,04	2,42	2,43	0,64	0,32	0,58	0,11	0,22	16,47
			18517	mit GV	47,42	10,77	4,57	14,36	2,30	2,33	0,72	0,31	0,55	0,10	0,22	16,32
	Mittel		47,34	10,78	4,61	14,20	2,36	2,38	0,68	0,32	0,56	0,11	0,22	16,40		
	Sand	18514	mit GV	50,97	6,44	2,90	18,95	1,23	1,75	0,94	0,47	0,23	0,08	0,13	15,91	
		18515	mit GV	50,74	6,29	3,24	19,11	1,28	1,73	0,89	0,52	0,23	0,08	0,12	15,76	
		Mittel		50,86	6,36	3,07	19,03	1,26	1,74	0,92	0,49	0,23	0,08	0,13	15,84	
	Spült		keine Probe													

Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung der nachtäglich übergebenen Reststoffe der trockenen Bauschutttaufbereitung

	Probe		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	GV 1025°C
			Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%
Proben- übergabe am 15.04.2019	Betonsand	19181	48,66	4,56	1,80	23,50	1,36	1,03	0,55	0,66	0,19	0,05	0,09	17,40
	Absieb	19182	59,82	9,27	3,51	12,39	1,52	1,84	0,67	0,72	0,46	0,090	0,120	9,45
	RC-Vorsieb	19183	54,80	8,29	2,92	15,15	3,78	2,46	0,55	0,96	0,37	0,070	0,120	10,38

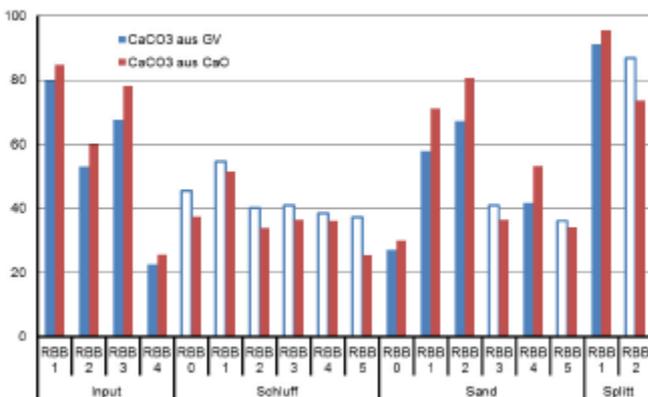


Abbildung 28: Berechnete CaCO₃-Gehalte des Aufgabematerials und der Produkte aus der Aufbereitung der Boden-Bauschutt-Gemische

Die Gehalte der Hauptoxide SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO und der Gehalt an SO₃ sind für die verschiedenen Probennahmen gegenübergestellt. Es treten beträchtliche Schwankungen auf. Lediglich der Schluff zeigt ausgeglichene Tendenzen. Das liegt daran, dass dieses Material die meisten Aufbereitungsschritte durchlaufen hat und die längste Verweilzeit in der Anlage aufweist. Wesentlichen Anteil daran werden auch Mischprozesse im Zuge der Schlammaufbereitung haben. Der

Gesamtsulfatgehalt ist insgesamt unkritisch, wenn der für rezyklierte Gesteinskörnungen geltende Grenzwert von 0,8 Masse-% säurelösliches SO_3 als Maßstab herangezogen wird.

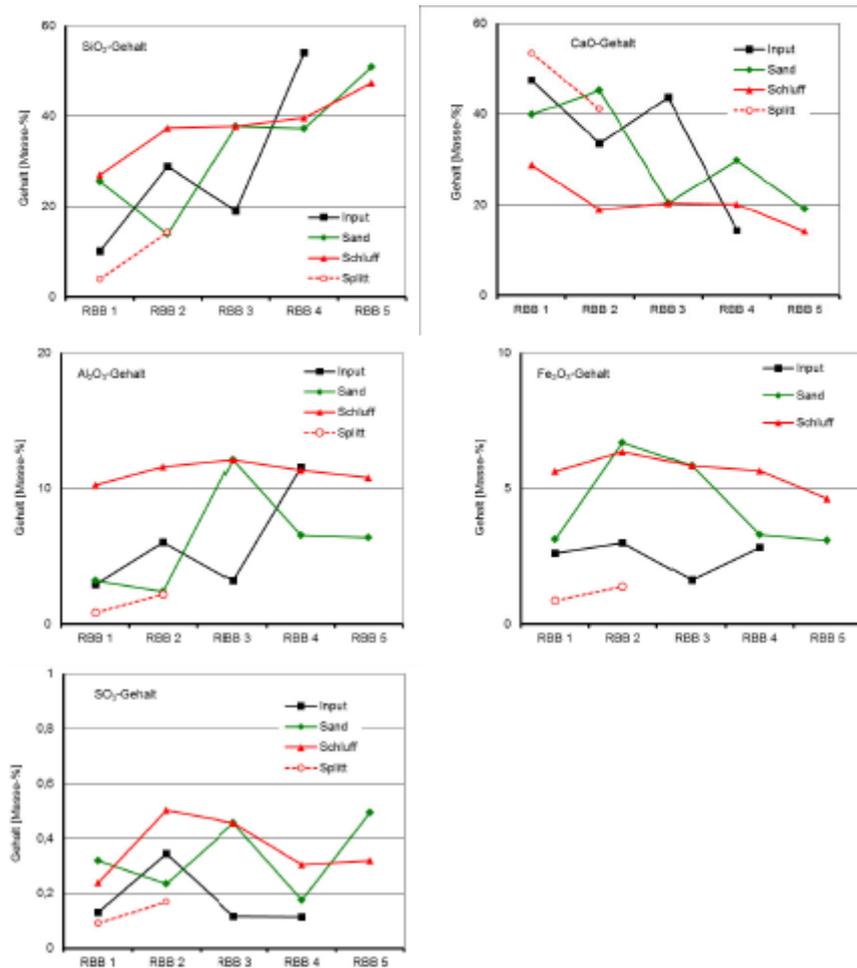


Abbildung 29: Hauptoxide und SO_3 -Gehalt der Produkte aus der Aufbereitung der Boden-Bauschutt-Gemische

4.4 Auswahl von Verwertungswegen

Splitte

Die aus dem Gleisschotter bzw. den Boden-Bauschutt-Gemischen gewonnenen Splitte bestehen überwiegend aus natürlichen Gesteinskörnungen. Für die aus den Boden-Bauschutt-Gemischen hervorgegangenen Splitte folgt aus den chemischen Analysen, dass sie überwiegend aus Kalkstein bestehen. Ihr Einsatz als Gesteinskörnung für die Betonherstellung ist denkbar. Dafür sind ausführliche Untersuchungen und eine Bewertung anhand der für natürliche Gesteinskörnungen geltenden Vorschriften vorzunehmen. Die bereits vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die Sulfat- und Chloridgehalte deutlich unter den Grenzwerten für Gesteinskörnungen, die im Beton eingesetzt werden sollen, liegen. Die Splitte weisen ein sehr enges Kornband auf. Ein Verschneiden mit den Sanden bis zu einem Anteil von etwa 20 % scheint möglich, ohne den Sollsieblinienbereich zu verlassen.

Sande

Die erzeugten Sande sind ebenfalls in die Kategorie der natürlichen Sande einzuordnen. Dafür spricht ihre hohe Rohdichte und geringe Wasseraufnahme. Ihr Einsatz als feine Gesteinskörnung für die Betonherstellung scheint ebenso wie bei den Splitten denkbar. Ausführliche Untersuchungen wären erforderlich.

Der Einsatz der Sande als Magerungs- und/oder Porosierungsmittel für die Herstellung von Ziegeln wurde für den Sand 17447 aus der Vorab-Probenahme untersucht (siehe Anhang 1). Die Probencharakterisierung ergab, dass Silikate und Karbonate die mineralogischen Hauptbestandteile sind. Der Anteil an Tonmineralen ist mit 3 Masse-% sehr gering. Das Material ist im Vergleich zu den üblicherweise eingesetzten keramischen Rohstoffen sehr grob. Der Anteil $> 20 \mu\text{m}$ lag bei über 90 %. Trotzdem war bei einer Substitution von 10 Masse-% einer Dachziegelmasse durch den Sand eine Formgebung möglich.

Die bei 1040°C gebrannten Probekörper wiesen gegenüber der Referenz eine erhöhte Porosität auf. Die Biegefestigkeit nahm im Vergleich zur Ausgangsmasse ab. Es wird eingeschätzt, dass der Einsatz des RC-Sandes für den Dachziegelbereich bzw. für andere dicht gebrannte Keramiken nicht geeignet ist, da er die maßgeblichen Werte verschlechterte. Vorstellbar ist ein Einsatz im Hintermauerziegelbereich, wo eine erhöhte Porosität des Scherbens gewünscht ist, um dadurch die Wärmedämmung zu verbessern.

Durch den Einsatz des RC-Sandes könnten Porosierungsmittel eingespart bzw. partiell ersetzt werden. Unabdingbar für einen Einsatz des Materials ist allerdings eine feinere Aufbereitung des Materials durch eine zusätzliche Mahlung. So könnte die aufgrund des hohen Carbonatgehaltes bestehende Gefahr des Kalktreibens beherrschbar werden.

Der Einsatz des Sands zur Herstellung von Flüssigböden (Anhang 2) ergab eine gute Eignung. Die zur Gewährleistung einer leichten Wiederaushubfähigkeit obere Festigkeitsgrenze von $0,3 \text{ N/mm}^2$ nach 28 Tagen wurde eingehalten. Die Wasserdurchlässigkeit ist $3,75 \times 10^{-2}$ sehr hoch. Wenn der Flüssigboden für den Einbau von zeitweise fließfähigem selbstverdichtendem Verfüllbaustoff (ZFSV) bei Stromtrassen vorgesehen ist, muss eine bestimmte Wärmeleitfähigkeit erreicht werden. Die Anforderung erfüllt der Flüssigboden aus dem Sand der Aufbereitungsanlage nicht.

Schluffe

Für die Schluffe bestehen sowohl von den Partikelgrößen her als auch vom Gehalt an Calciumcarbonat günstigere Voraussetzungen für die Verwendung in der Ziegelindustrie als für die Sande. So liegt der Anteil $> 20 \mu\text{m}$ bei den Schluffen bei etwa 20 %. Auch die gleichmäßigeren Eigenschaften lassen hier bessere Einsatzchancen erwarten. Die bisher praktizierte Zugabe von Kalk, um die Handhabbarkeit der Schluffe zu verbessern, ist dann allerdings nicht mehr möglich, so dass andere Methoden gefunden werden müssten.

Als weitere Verwertungsmöglichkeit der Schluffe ist der Einsatz als Rohmehlkomponente in der Zementindustrie denkbar. In diesem Fall hat die Kalkzugabe keine negativen Auswirkungen.

Der Einsatz des Schluffs zur Herstellung von Flüssigböden ist möglich. Im Unterschied zum Sand ist die pro m^3 Flüssigboden benötigte Compoundmenge niedriger. Die relativ hohe Eigenfeuchte – im vorliegenden Fall von etwa 10 % – stört nicht, wenn sie in der Mischungszusammensetzung berücksichtigt wird. Aus der Mischungsrechnung folgt, dass Schluff mit maximal 35 Masse-% Feuchtigkeit eingesetzt werden könnte. Dann ist keine zusätzliche Wasserzugabe erforderlich.

Die erreichten Festigkeiten sind ausreichend. Der Flüssigboden weist eine geringere Wasserdurchlässigkeit auf. Die Anforderungen an die Wärmeleitfähigkeit werden nicht erfüllt.

Der Einsatz des Schluffs für die Herstellung von Granulaten wurde im Labormaßstab mit verschiedenen Vorgehensweisen untersucht (Anhang 3). Es wurden sowohl Schwer- als auch Leichtgranulate hergestellt. Die hohe Feinheit des Materials kommt diesem Verwertungsweg entgegen.

Nachteilig ist dagegen der hohe Feuchtigkeitsgehalt des Schluffs, der eine direkte Verarbeitung nicht möglich macht. Da eine Trocknung aus energetischen Gründen nicht sinnvoll wäre, wurde versucht, durch die Mischung mit einem trockenen Ziegelmehl oder einem Mehl aus Mauerwerkbruch die Feuchte so einzustellen, dass eine Formgebung möglich war. Die notwendige Zugabemenge lag bei etwa 50 %. Die Rohdichten der Granulate waren zufriedenstellend.

Technologische Vorschläge

Bei der Bodenaufbereitung werden in der Regel Materialien, die sich in ihrer Zusammensetzung erheblich unterscheiden, behandelt. Mit den eingesetzten Technologien erfolgen hauptsächlich die Reinigung und die Trennung nach Partikelgrößen. Eine Einflussnahme auf die Materialzusammensetzung hinsichtlich der Chemie und Mineralogie ist nicht möglich. Um trotzdem zu Produkten zu kommen, deren Eigenschaften wenig schwanken, und um einen möglichst stabilen Anlagenbetrieb zu realisieren, sind folgende Maßnahmen zu empfehlen:

- ausreichende Vorratshaltung der zu bearbeitenden Böden, Gleisschotter und Gemische,
- Lagerung des angelieferten Materials unter Dach, um Ausgleichsfeuchte zu erreichen und dadurch Störungen im Verfahrensablauf durch bindiges Material zu reduzieren,
- Vorhomogenisierung des Materials vor der Aufgabe mittels stationärer Technik als zusätzlicher Verfahrensschritt.

Für die Vorhomogenisierung eignen sich Mischbettverfahren (Abbildung 30). Dafür werden ein Absetzer und ein Rückladegerät benötigt.

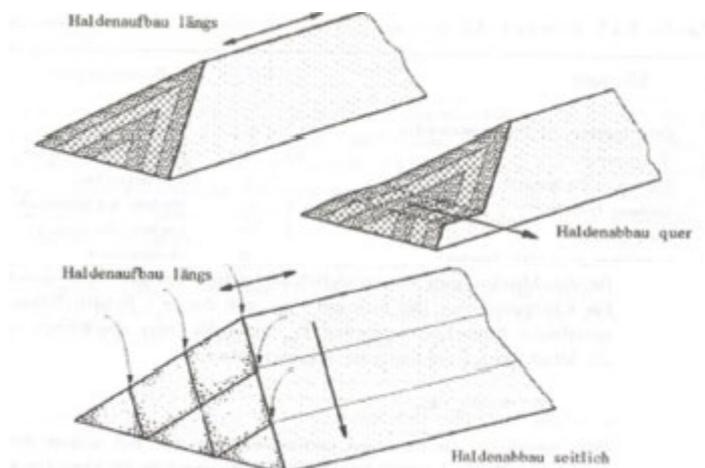


Abbildung 30: Haldenaufbau zur Vorhomogenisierung von Schüttgütern nach der Chevron-Methode (oben) bzw. nach der Windrow-Methode (unten), entnommen aus [4]

Anstelle der Vorhomogenisierung ist auch die Homogenisierung der Produkte denkbar. Das gilt insbesondere für die Sande und Splitte. Auch in diesem Fall ist ein systematischer Haldenaufbau und -abbau erforderlich, allerdings in kleineren Dimensionen. Die erreichten Vergleichmäßigungseffekte, einschließlich des optischen Erscheinungsbildes, wären zunächst im Technikumsmaßstab zu überprüfen. Eine positive Beeinflussung des Anlagenbetriebs ist in diesem Fall allerdings nicht möglich.

Eine weitere Maßnahme betrifft die Schlammentwässerung. Vorzugsweise werden bei der Bodenaufbereitung Kammerfilterpressen eingesetzt. Gelegentlich finden auch Bandpressen Anwendung. Ob und welche technologischen Veränderungen der Schlammentwässerung vorgenommen werden, ist in engem Zusammenhang mit dessen Verwertung zu betrachten.

4.5 Optionen zur Verwertung der Gesteinsfraktionen

Ungebundene Schichten im Straßenbau

Der klassische Verwertungsweg für mineralische Bauabfälle und hier insbesondere von Altbeton, klassischem Bauschutt aus der Aufbereitung von Bauwerken aber auch aus der Aufbereitung von Altmassen aus dem Straßenbau selbst ist die Herstellung von Frostschutz- und Schottertragschichten. Bei diesen handelt es sich um qualifizierte Baustoffe für den Straßenoberbau. Um eine ausreichende Tragfähigkeit dieser Schichten sicherzustellen, bei den Frostschutzschichten ergänzt um eine ausreichende Drainage gegenüber stauender Nässe, müssen diese Baustoffe dezidierte Eigenschaften erfüllen.

Die geltenden Regelwerke hierfür sind die Technischen Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein StB 04:2007 [5]) und die Technischen Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (TL SoB StB 04 [6]). Letztere gelten für Frostschutzschichten (FSS) und Schottertragschichten (STS). Die technischen Lieferbedingungen hat der Baulastträger Bund für sein Straßennetz Bundesautobahn und Bundesstraßen als Regelwerk erlassen. Da dieses Straßennetz in den einzelnen Bundesländern durch Landesbetriebe betreut wird und diese Landesbetriebe in der Regel auch für die Kreisstraßen zuständig sind, hat dieses auch bei diesen Baulastträgern zwangsläufig Einzug gehalten. Die technischen Lieferbedingungen TL repräsentieren den Stand der Technik, so dass sich auch die Kommunen für ihr Straßennetz im Allgemeinen danach richten.

Die Anforderung an die physikalischen Eigenschaften lassen sich auch über eine trockene Aufbereitung von Hochbauschutt einhalten und hier insbesondere hinsichtlich Schlagzertrümmerung und Frostsicherheit. Dies gilt insbesondere für FSS Frostschutzmaterial. Die Anforderungen an STS Schottertragschichtmaterial lassen sich in aller Regel nur aus der Aufbereitung von reinem Altbeton, Gleisschotter oder Altmaterial aus den ungebundenen Schichten des Straßenoberbaus einhalten.

Die Anforderungen an die Zusammensetzung sind in Tabelle B.1 der TL Gestein genannt. Danach darf in der Fraktion >4mm der Anteil Asphalt, Ziegel-Mauerwerk jeweils nur maximal 30 % betragen. Der Anteil Kalksandstein ist auf 5% begrenzt. Beides ist bei den hier zur Aufbereitung diskutierten Abfallmassen kein Problem.

Die Begrenzung von mineralischen (Bims etc.) oder organischen Leichtstoffen (<0,2%) dürfte nach der nassen Aufbereitung und Klassierung kein Problem darstellen. Im Gegensatz zur klassischen trockenen Aufbereitung ist die Nassklassierung mit einer Leichtstoffabscheidung verbunden, in der verlässlich alle Materialien mit einer Dichte < 1 kg/m³ abgeschieden werden können.

Für diese ungebundenen Schichten wird eine Kornabstufung in einer Sieblinie benötigt, die gerade bei Frostschutzschichten in recht hohen Anteilen auch Feinmaterial benötigt. Eine Nassklassierung ist dementsprechend zunächst kontraproduktiv. Immer dann, wenn es sich nicht um sandige / kiesige Böden handelt, ist die Abtrennung des Schluffanteils jedoch unabdingbar, da nur so die Frostsicherheit gewährleistet werden kann.

Fazit

Die Einhaltung der technischen Eigenschaften nach TL SoB stellt in der Regel kein Problem dar. Es kann davon ausgegangen werden, dass angesichts des Ausgangsmaterials Boden, Boden-Bauschutt oder steinreicher Boden die Körnungen zu einem erheblichen Anteil aus Naturstein besteht, die in aller Regel die notwendigen physikalischen Parameter aufweist und auch frostbeständig ist.

Das aus der Aufbereitung entnommene Material dürfte problemlos als Ausgangsmaterial für ungebundene Schichten geeignet sein. Da im Kornband der Anteil < 2 mm fehlt, könnte man diesen Massenstrom auch gezielt mit Brechsanden oder andernorts in der trockenen Aufbereitung anfallenden Feinmaterialüberschüssen ergänzen. Im Umkehrschluss ließe sich der aus der Aufbereitung gewonnene Massenstrom auch in einem zu feinen Material als Grobzuschlag einsetzen, um die geforderte Sieblinie einzustellen.

Dieser Ansatz wurde im Rahmen des Forschungsprojektes nicht über Laboruntersuchungen vertiefend untersucht. Es handelt sich um den klassischen Absatzweg für mineralische Bauabfälle, die obigen Überlegungen wurden jedoch mit Unternehmen diskutiert.

Gesteinskörnung für die Beton- und Asphaltindustrie

Sowohl die Betonindustrie als auch die Asphaltindustrie benötigen Gesteinskörnungen >2mm, die definierten Anforderungen genügen müssen. Diese sind mit DIN EN 12620 (Beton) [7] und DIN EN 13043 (Asphalt) [8] allgemeinverbindlich geregelt. Angesichts der Belastungen, denen die Produkte ausgesetzt sind, sind die Anforderungen an die physikalischen Eigenschaften vergleichsweise hoch. Nicht jedes natürliche Gesteinsvorkommen eignet sich hierfür.

Beide Absatzwege sind insbesondere für die Materialien aus der Aufbereitung von Gleisschotter geeignet. Für die Herstellung von Gleisschotter werden nur besonders harte und widerstandsfähige Gesteinsvorkommen (DIN EN 13450) [9] abgebaut. Es gibt nur wenige Steinbrüche, die Lieferanten für DB Netz sind. Entsprechend lukrativ ist die Aufbereitung der Gleisschottermaterialien und Rückführung in den Gleisbau. Wird der Feinkornanteil abgezogen und durch schonendes Brechen wieder die geforderte Kantigkeit erreicht, kann das Material wieder in den Gleisbau zurückgeführt werden. Gleisschotter hat gemäß DBS 918061 die Körnung 31,5/63. Nach der Aufbereitung des Gleisschotters verbleibt eine Körnung 2/31,5, die gebrochen ideal für die Beton- und Asphaltindustrie verwendet werden kann. Das Größtkorn liegt hier meist bei 16 mm (oder 22 mm).

Auch wenn das Ausgangsmaterial nicht steinige Böden, sondern Böden mit Bauschuttanteilen sind, dürften sowohl die umwelttechnischen als auch die bauphysikalischen Eigenschaften erreicht werden.

Die umwelttechnischen Anforderungen sind für die Gesteinskörnung im Beton nach DIN 4226-101 geregelt. Die Werte orientieren sich an denen der LAGA Mitteilung 20 [10], die die maximal zulässigen Schadstoffgehalte und –freisetzungsraten (über Elution) in Abhängigkeit der Einbauweisen regelt. Die Zuordnung der Materialien zu erlaubten Einbauweisen erfolgt über Z-Werte als Zuordnungswerte, d.h. jeweils erlaubte Schadstoffwerte. Die höchsten Werte (Z 2) sind in den Einbauweisen erlaubt, in denen kein Kontakt zu Niederschlagswasser besteht wie bspw. Einsatz im Straßenbau unter einer geschlossenen Asphaltsschicht und ein ausreichender Abstand zum Grundwasser gewährleistet ist.

Die DIN 4226-101 [11] greift diese Philosophie auf und orientiert sich bei ihren Maximalgehalten und –freisetzungsraten an den Werten, die im umgebundenen Bereich maximal erlaubt sind. Im Beton gebunden in der Zementmatrix ist man hier hinsichtlich möglicher Umweltgefährdungen damit auf der sicheren Seite. Ähnliches gilt für den Asphalt und die Bindung der Stoffe über den Bitumen.

Die umwelttechnischen Anforderungen stellen schon bei konventionell trocken aufbereiteten Abfallmassen kein Problem dar. Die nasse Aufbereitung und damit Wäsche reduziert hier das „Gefährdungspotenzial“ weiter.

Aus bauphysikalischer Sicht ist eine Verwendung der Gesteinskörnungen ebenfalls möglich. Fa. Feeß aus Kirchheim/Teck beweist die Qualität der RC-Gesteinskörnungen in der täglichen Praxis, indem sie aus mineralischen Bauabfallmassen eine Gesteinskörnung für die Betonindustrie herstellt, die dem Typ 2 nach DIN 4226-101 entspricht. Dies ist eine RC-Gesteinskörnung, die bis zu 30 % Ziegel oder Kalksandstein enthalten darf und trotzdem den Anforderungen der DIN EN 12620 entsprechen muss. Am ehesten problematisch sind die Anforderungen an Frost-Tauwiderstand und Gehalt wasserlöslicher Sulfate einzuhalten. Aufgrund der nassen Aufbereitung sind die Probleme mit den wasserlöslichen Sulfaten angegangen und auch der Frost-Tauwiderstand ist ebenfalls erreichbar. Die Werte werden trotz es Ziegelanteils erreicht. Angesichts deren im Vergleich zu den meisten natürlichen Gesteinskörnungen höheren Porosität dürften daher für Gesteinskörnungen aus der Nassklassierung und Aufbereitung von Böden keine Probleme zu erwarten sein.

Nach der DIN 4226-101 [11] wird auch die Zusammensetzung der RC-Gesteinskörnung vorgegeben. Gegenüber den Anforderungen für die ungebundenen Schichten (TL SoB StB 04 bzw. TL Gestein 04) ist die Begrenzung von maximal 30 % Mauerwerk nicht auf Ziegel beschränkt, sondern umfasst auch alle anderen nicht-schwimmenden mineralischen Baustoffe wie bspw. Kalksandstein. Diese Anforderungen an die Begrenzung bestimmter Massenanteile sind daher zunächst deutlich einfacher einzuhalten, da schwimmende Bestandteile verfahrensbedingt abgeschieden werden.

Fazit

Die Verwendung von aufbereitetem Gleisschotter stellt kein Problem dar, im Gegenteil. Angesichts der bauphysikalischen Eigenschaften ist der Einsatz von diesem Altmaterial in der Beton- wie in der Asphaltindustrie sehr gewünscht.

Betonwerke richten ihre Rezepturen auf die spezifischen Eigenschaften der einzelnen Rezepturbestandteile aus und damit auch auf die Gesteinskörnungen als Zuschlag. Das gilt insbesondere dann, wenn wie im Falle der Gesteinskörnung Typ 2 in größerem Umfang Bestandteile enthalten sind, die gerade auch hinsichtlich Wassersaugen problematisch sind bzw. von der primären Gesteinskörnung abweichen.

Bei den Böden und Boden-Bauschuttmischungen lassen sich die Inputgrößen nur bedingt steuern. Die Zusammensetzung und Eigenschaft ergibt sich aus dem jeweiligen geogenen Hintergrund des Materials und der Art und dem Umfang von anthropogenen Beimengungen. Um trotzdem die geforderten Eigenschaften sicher einhalten zu können, bietet es sich an, die Gesteinskörnung aus der Nassklassierung aufbereiteten Altbetone zuzudosieren und sich hier an den 30 % Massenanteilen zu halten, die der Typ 2 erlaubt. Mit den kleinen Anteilen in der Gesamtgesteinskörnung dürften deren Gesamteigenschaften kaum bzw. nicht mehr tangiert werden, als es für die konventionelle Gesteinskörnung Typ 2 gilt.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde dieser Ansatz nicht vertiefend über Laboranalysen untersucht, da es sich um einen im Ansatz etablierten Absatzweg für mineralische Bauabfälle handelt. Die obigen Überlegungen wurden jedoch mit Unternehmen diskutiert.

4.6 Optionen aus der Verwertung der Sandfraktion

Einsatz in der Betonindustrie

Betonrezepturen bestehen aus einer Mischung aus Gesteinskörnung, Sand sowie Zement und Wasser. Dazu kommen Inputs aus der Bauchemie, insbesondere Fließmittel. Die Anteile der einzelnen Rezepturbestandteile sind von Betonrezeptur zu Betonrezeptur leicht unterschiedlich, auch abhängig von der geforderten Leistungsfähigkeit der produzierten Betone und der regionalen Versorgungssituation mit Rohstoffen. Der Sandanteil liegt in der Regel bei etwa 30%.

Die Rahmenbedingungen zum Einsatz von Gesteinskörnungen und Sand aus der Kreislaufwirtschaft in Betonrezepturen werden in Regelwerken festgelegt. Einen guten aktuellen Überblick gibt ein Leitfaden des Umweltministeriums Baden-Württemberg [12]. Die Richtlinie des Deutschen Ausschusses zum Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen [13] schließt den Einsatz von Körnungen <2mm in den Betonrezepturen dezidiert aus.

Eine Gesteinskörnung ist jedoch nicht deswegen automatisch eine rezyklierte Gesteinskörnung, weil sie in Aufbereitungsanlagen wie bspw. der Nassklassierung von Böden gewonnen wurde. Die DIN 4226-101 für rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton benennt im Kapitel 3, in dem Begriffe definiert werden, unter 3.1 rezyklierte Gesteinskörnungen: „Gesteinskörnungen, die durch die Aufbereitung anorganischen oder mineralischen Materials entstanden sind, das zuvor als Baustoff eingesetzt war.“ Der Sand aus der Nassklassierung von Böden fällt demnach nicht unter die Definition: rezyklierte Gesteinskörnungen. Das Material war nicht zuvor als Baustoff eingesetzt. Es handelt sich um bspw. Bodenaushub, der in die einzelnen Korngruppen Schluff/Ton, Sand und Körnung aufklassiert wird. Selbst wenn im Rahmen der Aufbereitung ein Teil der Körnung zu Sand gebrochen wird, ändert sich an dieser Zuordnung nichts.

Der Einsatz der Sandfraktion aus der Nassklassierung in Betonrezepturen ist damit durch die Regelwerke gedeckt. Die Sande müssen aber – wie alle Zuschläge in Betonrezepturen – den Anforderungen der DIN EN 12620 genügen und ein CE-Kennzeichen haben. Der Sand muss entsprechend in das Überwachungs- und Gütesicherungsprogramm einbezogen werden und neben den technischen physikalischen Eigenschaften auch den Umweltkriterien nach der DIN 4226-101 entsprechen.

Die Versuche zum Einsatz dieser Sande in den Betonrezepturen waren durchwegs erfolgreich. Die nach dem Regelwerk geforderten Eigenschaften des Sandes wurden problemlos erreicht. Auch die Kornabstufung innerhalb des Spektrums 0/2mm liegt innerhalb der eingeräumten Toleranzen. Auch die Erkenntnisse aus dem Betonlabor eines großen Transportbetonwerks zeigten hervorragende Ergebnisse – die Sande sind bestens für den Einsatz in Betonrezepturen geeignet und können dort den Primärsand zu 100% ersetzen.

Fazit

Die bei der Nassklassierung von Böden anfallenden Sande sind keine Brechsande. Jeder natürliche Boden weist das gesamte Kornspektrum auf, nur in unterschiedlichen Anteilen. So enthält jeder Boden selbstverständlich auch die Korngruppe Sand. Werden die Böden über die nasse Aufbereitung und Klassierung gegeben, werden diese Sandanteile aus dem Gemisch separiert und nach der Aufbereitung als nasser Sand bereitgestellt. Es handelt sich um natürliche Sande, als aus allen Böden ausgewaschene und separierte Sandfraktion. Die Sande sind zudem gewaschen, d.h. weitestgehend frei von Schluff und damit abschlämbbaren Anteilen.

Die Sande aus der Nassklassierung lassen sich ohne Abstriche als Rohstoff in den Betonindustrie verwenden. Der im Rahmen des Forschungsprojektes gesuchte Austausch mit der Betonindustrie zeigte großes Interesse an diesem Rohstoff.

Einsatz von Sand und Körnung in der Herstellung von Betonwaren

Neben Transportbeton hat auch die Produktion von Betonwaren und Betonfertigteilen eine größere Bedeutung. Das hier verwendete Kornspektrum ist ein deutlich anderes, es werden deutlich mehr Feinanteile eingesetzt und das Größtkorn liegt meist niedriger (8mm).

Einsatz von Materialien aus der Kreislaufwirtschaft

Im Rahmen einer von BWPLUS geförderten Kurzstudie der HTWG Konstanz [14] wurden 2016 die Einsatzmöglichkeiten einer rezyklierten Gesteinskörnung und die Übertragbarkeit der Erfahrungen aus dem Transportbeton geprüft. Im Ergebnis zeigte sich, dass es in beiden Bereichen weite Einsatzmöglichkeiten gibt, die in den 90er Jahren für Betonwaren auch schon ausgelotet und in Produktionslinien umgesetzt wurden. Aus wirtschaftlichen Gründen wurden diese damals aber nicht mehr weiterverfolgt.

Betonfertigteile werden industriell in Fertigungsstraßen produziert. Die Fertigteile werden in Formen gegossen und müssen zeitnah eine hohe Grünfestigkeit erreichen, um sie nach möglichst kurzer Zeit vom Produktionsband nehmen und der Trocknung übergeben zu können. Diese Grünfestigkeit wird mit vergleichsweise hohen Zementanteilen in den Rezepturen erreicht. Dies macht den Einsatz von RC-Gesteinskörnung oder –sand aufgrund einer möglichen Alkali-Kieselsäure-Reaktion problematisch. Die Betonfertigteile würden durch eine mögliche Volumenvergrößerung (Alkalitreiben) geschädigt.

Mit der Alkali-Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [15] werden vorbeugende Maßnahmen benannt, die diese Reaktionen verhindern sollen. Da für ein Recyclingmaterial nie sichergestellt werden kann, dass nicht freie Kieselsäuren vorliegen, erfolgt die Einordnung in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S, nach der im trockenen (W0) oder feuchten (WF) Einsatzbereich von Betonen der Zementgehalt auf maximal 350 kg/m³ Beton begrenzt werden muss. Die Betonrezepturen für Betonfertigteile weisen jedoch meist höhere Zementgehalte auf.

Bei Betonwaren hat der mögliche Einsatz von RC-Gesteinskörnungen oder –sand eine neue Aufmerksamkeit erhalten. Die Bereitschaft, diese Rohstoffe einzusetzen und dies auch offen zu kommunizieren, ist gestiegen. Dies ist einmal auf die sich zunehmend verknappende Rohstoffversorgung zurückzuführen, zum anderen aber auch den wachsenden Stellenwert des Ressourcenschutzes in der allgemeinen Wahrnehmung und daher auch in der Kundenakzeptanz.

Dies zeigt das Beispiel der Fa. Rinn⁶, die als eine zumindest zukünftige Maßnahme für den Umweltschutz den Einsatz von „Recyclingbeton“ ankündigt, als Maßnahme zur Schließung von Kreisläufen und wahrscheinlich vorrangig zur Rücknahme von Altpflaster und den Wiedereinsatz gebrochen in der Produktion.

Ein weiteres Unternehmen ist BNB⁷ aus Potsdam-Babelsberg. Dieses Unternehmen produziert Betonwaren aber auch –fertigteile in einer Manufaktur, d.h. in kleinen Stückzahlen und geringer Automatisierung. Hier werden seit einiger Zeit RC-Gesteinskörnungen verwendet und dies offen beworben.

Das klassische Massenprodukt bei Betonwaren sind die Pflastersteine. Der Pflasterstein besteht aus einem Unterteil, auch Kernbeton genannt, und einer Deckschicht, auch Vorsatzbeton genannt. Der

⁶ <https://www.rinn.net/>

⁷ <http://www.bnb-potsdam.de/produkte/>

Vorsatzbeton ist die oberste Lage eines zweischichtig aufgebauten Pflastersteins aus Beton. Diese Vorsatzschicht ist verschleißfest, abriebfest und frostwiderstandsfähig und zum Teil ölbeständig. Der Vorsatzbeton weist eine andere, höherwertige Betonzusammensetzung auf als der Kernbeton. Die Beanspruchung des Kernbetons ist geringer, vor allem auch gegenüber Frost / Tausalz. Die Zementgehalte liegen zwischen 250 bis 350 kg/m³, besonders bei modernen Anlagen nicht selten bei < 300 kg/m³.

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen des Forschungsprojektes der Austausch mit den Verbänden sowie den Herstellern im näheren Umfeld des Standortes der Nassklassierungsanlage gesucht. In einigen Werken wurde bereits RC-Gesteinskörnung eingesetzt. Dies waren Produzenten von Betonfertigteilen für den Tiefbau und Produzenten von Treppen und ähnlichen Fertigteilen. Über den Projektverlauf hinweg ist es nicht gelungen, weitere Unternehmen für den Einsatz einer RC-Gesteinskörnung zu gewinnen. Dies war in der Regel auf ökonomische Rahmenbedingungen zurückzuführen. Bei eher kleinen Durchsatzleistungen war die Produktionstechnik nicht auf die Zudosierung einer weiteren Gesteinskörnung ausgelegt, die Betriebe hatten keine Möglichkeiten zur Lagerhaltung weiterer Gesteinskörnungen. Der aus dem Einsatz der RC-Gesteinskörnung resultierende mögliche ökonomische Vorteil in den Gestehungskosten machte die zu tätigen Investitionen noch nicht wirtschaftlich.

Einsatz von Materialien aus der Nassklassierung von Böden

Wie auch schon für den Einsatz in der Herstellung von Transportbeton ausgeführt, stehen der Verwendung von Sanden und Gesteinskörnung aus der Wäsche und Nassklassierung von Böden weder technische noch regulatorische Hemmnisse entgegen. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden daher keine Impulse zur Erschließung dieser Absatzwege gesetzt. Auch die faktische Vermarktung erfolgte über die Transportbetonindustrie.

Fazit

Die Betonfertigteile – und Betonwarenindustrie ist für den Absatz von Sanden und gerade auch feineren Gesteinskörnungen interessant. Die Industrie ist mittelständisch aufgestellt. Sie verfügt auch in der Regel nicht über eigene Rohstoffvorkommen, d.h. insbesondere Sand- und Kiesgruben.

Die chemischen Anforderungen an den Rohstoff sind zudem begrenzt und analog dem Transportbeton. Begrenzend sind hier die Gehalte an Sulfaten und Chloriden. Die Betonrezepturen werden auf die Eigenschaften der Rezepturbestandteile abgestimmt. Entsprechend wichtig ist es, dass die RC-Zuschläge homogenisiert sind und über große Massenströme hinweg in gewissen Schwankungsbereichen im Ansatz reproduzierbare Eigenschaften und Zusammensetzungen aufweisen.

Faktisch erweist sich die Frage der Zudosierung einer weiteren Gesteinskörnung im Produktionsprozess als zentraler Hemmschuh. Dies ist dann ein Problem, wenn ein Material eingesetzt werden soll, welches nur einen Teil der Rohstoffe ersetzen kann. Dies trifft für die RC-Gesteinskörnung zu, die nur in Anteilen im Beton oder – im Falle der Produktion von Pflastersteinen oder Randsteinen – nur im Kernbeton und nicht in der Vorsatzschale eingesetzt werden kann. Die Produktionstechnik müsste entsprechend auf eine weitere Zudosiermöglichkeit umgestellt werden, die Betriebe müssten auch zur Lagerung eines weiteren Rohstoffes in der Lage sein.

Diese Problemsituation ist grundsätzlich vergleichbar mit der Transportbetonindustrie. Dort ist eine erforderliche Umstellung wirtschaftlich einfacher zu bewerkstelligen, da diese Standorte in aller Regel höhere Durchsatzleistungen und damit bessere Amortisationsraten für die notwendigen Investitionen haben.

Während sich aus diesen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Einsatz von Sanden und Körnungen aus dem Materialkreislauf als eher schwierig erweist, steht dem Einsatz von Sanden und Körnungen aus der Aufbereitung und Nassklassierung von Böden nichts entgegen.

Sande für die Zementindustrie

Schon lange beschäftigt die Zementindustrie die Frage der Rohstoffverfügbarkeit aber auch der großen ökologischen Rücksäcke des Zements und damit der Betonprodukte. Klassisch ist die Verwendung unterschiedlicher Ersatzbrennstoffe zur Befuerung der Drehrohre. Mit den Kompositzementen wurde die Klinkeranteile durch die Verwendung von Hüttensanden oder (Steinkohle)Flugaschen reduziert. Die Produktion von CEM II ff hat eine größere Bedeutung erlangt. Mit Umstellung der Stromproduktion und Ersatz der Kohlekraftwerke werden die Flugaschen in Zukunft nicht mehr zur Verfügung stehen. Inwieweit die Verfügbarkeit von Hüttensanden rückläufig sein wird, ergibt sich aus der Entwicklung der Stahlbranche in Deutschland. Hier könnte es weitere Verlegungen von Produktionsstandorten geben. Die Entwicklung neuer Zemente hat daher für die Zementindustrie einen großen Stellenwert. Der Fokus liegt im Moment etwas auf dem Einsatz von Kalkstein.

Schon heute werden aber auch (in kleinen Anteilen) Böden in das Drehrohr aufgegeben, wie das Beispiel der Juracement⁸ zeigt, und substituieren dort Mergel. Eingesetzt werden Böden, die bei Aufbereiter Richi aus Weiningen entsprechend vorkonditioniert werden.

Die tonigen Materialien bringen positive Eigenschaften mit, wie nicht zuletzt auch die aktuellen Untersuchungen des VDZ Düsseldorf [16] zeigen die in dem BMBF-Verbundforschungsvorhaben R-Beton durchgeführt wurden. Untersucht wurde unter anderem der Einsatz von Brechsanden aus der Aufbereitung von Bauschutt / Mauerwerk und zwar als Hauptbestandteil in der Mühle und damit nach dem Drehrohr. Substituiert werden könnten hier die genannten industriellen Nebenprodukte, es kann in großem Stil und fast massenäquivalent Klinker substituiert werden. Auf diesen Ergebnissen aufbauend werden in anderen Projektzusammenhängen weitere Forschungen durchgeführt werden.

Interessant sind für die Zementindustrie demnach vor allem tonige mergelige Materialien und Sande.

Bei der Nassklassierung von Böden fallen diese Materialien grundsätzlich zur Verwertung an. Im Rahmen des Projektes erfolgte der Austausch mit einem benachbarten Zementwerk. Außerdem wurde ein Zementwerk in der Schweiz besucht, das in großem Stil zur Rohstoffversorgung auf Böden zurückgreift. Wie schnell deutlich wurde, sind diese Absatzwege nur mit hohen Zuzahlungen erschließbar und damit für die Materialien aus der Nassklassierung uninteressant. Diese Wege werden, wenn für Böden gangbar sein, die aufgrund ihrer (organischen) Belastung ansonsten teuer entsorgt werden müssten. Die Ergebnisse zum Einsatz von Sanden nach dem Drehrohr wurden mit Brechsanden aus der Aufbereitung von Mauerwerk erzielt. Es handelt sich um Brechsande aus der trockenen Aufbereitung. Der Aufwand der Wäsche ist für die gewünschten Eigenschaften nicht erforderlich. Die damit verbundenen Kosten werden nicht honoriert.

Fazit

Der Einsatz von Sanden und Brechsanden in der Zementindustrie scheint erfolgversprechend. Gerade die Materialien aus Mauerwerk und damit tonigen Komponenten bringen positive Eigenschaften und versprechen, in Zukunft möglicherweise als Hauptbestandteil eingesetzt werden zu können und dies in Konkurrenz zur Verwendung von gebranntem Klinker. Hierzu bedarf es aber noch weiterer umfassender Forschungsprogramme und Produktentwicklungen. Die positiven Eigenschaften wurden mit Brechsanden aus der trockenen Aufbereitung erzielt. Es zeichnet sich derzeit nicht ab, dass über

⁸ <http://www.juracement.ch/htm/2397/de/Alternative-Rohmaterialien.htm>.

eine Wäsche weitere Verbesserungen zu erzielen wären. Zum derzeitigen Stand ist daher der Einsatz in der Zementindustrie keine Option für die Sande aus der Nassklassierung. Der Outputmassenstrom aus einer derartigen Anlage steht zudem im krassen Missverhältnis zu dem Bedarf eines Zementwerkes.

Die Zementindustrie hat durchaus Interesse am Einsatz von Böden, um den Rohstoff Mergel substituieren zu können. Dies wird, gerade auch in der Schweiz, schon in großem Umfang praktiziert. Auch hier wird eher auf Rohböden oder trocken aufbereitete Böden zurückgegriffen und dies auch nur, wenn vergleichsweise hohe Zuzahlungen erfolgen. Dies stellt daher eine Option für die Entsorgung belasteter Böden dar, die ansonsten andernorts teuer entsorgt werden müssten.

Herstellung von Mörtel und Putzen auf Zementbasis

Mörtel auf Zementbasis entspricht weitgehend einem Beton – das Größtkorn ist jedoch auf maximal 4 mm begrenzt. Bei den Mörtelarten wird unterschieden zwischen Mauer- und Putzmörtel. Die entsprechenden Zuschläge werden in der Bauindustrie als Mauersande und Putzsande bezeichnet. Estrichsande sind Zuschläge für Estrich.

Mauersande als Zuschläge für Mauermörtel (DIN 1053, T1 - T3) [17] sollen ein breites Körnungsspektrum mit Anteilen von 24 - 40 % der Körnung 0,06 - 0,5 mm besitzen. Das Größtkorn beträgt 2 mm, der Anteil an abschlämmbaren Bestandteilen < 0,06 mm ist auf maximal 8 % begrenzt. Die Kornform sollte möglichst kubisch sein.

Putzsande für Putzmörtel (DIN 18 550) [18] sollen 10 - 40 % Massenanteile der Körnung 0,09 - 0,25 mm aufweisen, der zulässige Schlammkornanteil < 0,06 mm beträgt maximal 5 %. Als Größtkorn sind bei Feinputz 1 - 2 mm, bei Grobputzen je nach Putzart 2, 4 und 8 mm zugelassen. Eine gedrungene Kornform wird zwingend gefordert.

Estrichsande (DIN 18 560, T1 - T6) [19] dürfen einen Schlammkornanteil von maximal 3 % besitzen. Der Massenanteil der Korngrößen 0,06 - 2 mm ist auf 70 % begrenzt. Das Größtkorn beträgt je nach Estrichart 4 oder 8 mm. Estrichsande dürfen keinerlei organische Beimengungen enthalten.

Chemische Anforderungen müssen die Sande – analog zur Diskussion Beton – nicht erfüllen. Ausnahme sind Sulfat- und Chloridgehalte, die aber eingehalten werden können, wie die Untersuchungen zeigten.

Analog zum möglichen Einsatz der Sande in der Betonproduktion sind die Rahmenbedingungen grundsätzlich günstig. Die vergleichsweise hohen Anforderungen an die Kornabstufung lassen sich jedoch mit der Nassklassierung in der jetzigen technischen Auslegung nicht sicher einhalten. Hier wären zumindest weitere Klassiereinheiten notwendig und würde eine Umrüstung in Richtung der Standards der Kies- und Sandindustrie bedeuten.

Fazit

Die Begrenzung der Anteile an abschlämmbaren Anteilen dürfte für Stoffströme aus der Nassklassierung kein Problem darstellen. Auch die Kornform kubisch bzw. gedrunge dürfte bei einem natürlichen Korn oder auch einem gebrochenen Korn aus der Prallmühle machbar sein. Schwieriger einzuhalten sind die genaueren Kornabstufungen innerhalb des Sandes oder teilweise auch mit etwas größerem Größtkorn.

Dies bedeutet für die Nassklassieranlage eine Nachrüstung. In der Praxis scheint es da sinnvoller, Sande zunächst in die Betonproduktion unterzubekommen. Die Herstellung von für Mörtel und Putze geeignete Sande wäre darauf aufbauend ein Zusatzschritt.

Der Markt für diese Putze und Mörtel ist umkämpft, Produkte auf Gips- und Anhydritbasis haben sich größere Marktanteil erschlossen.

Einsatz in der Kalksandsteinindustrie

Kalksandstein (KS) dient als Baustoff für Innen- und Außenwände im tragenden und nichttragenden Bereich. Auf dem Markt werden Steine unterschiedlicher Rohdichten und Druckfestigkeiten angeboten.

Kalksandsteine werden aus den Rohstoffen Kalk, mineralischen Gesteinskörnungen und Wasser hergestellt. Es werden keine Zusatzstoffe verwendet. Als Gesteinskörnungen werden Quarzsande oder auch gebrochenes Natursteinmaterial eingesetzt, die regional zur Verfügung stehen. Die Rohstoffe werden im erdfeuchten Zustand mechanisch verdichtet und anschließend in Autoklaven unter gespanntem Wasserdampf gehärtet. Im Wesentlichen finden während dieser Hydrothermalhärtung im Porenraum der Kalksandstein-Rohlinge Reaktionen zwischen dem Kalkhydrat und der gelösten Kieselsäure statt. Dabei bilden sich dauerhafte Calciumsilikathydrate (CSH-Phasen), die dem Gefüge der Kalksandsteine ihre Festigkeit verleihen.

Das dichte Netz an Produktionsstandorten (derzeit 80 KS-Werke), Dies entspricht einer Verdoppelung in einem Zeitraum von 6 Jahren und einem aktuellen Marktanteil von 12 Gew.-%.

Grundsätzlich ist die Kalksandsteinindustrie gegenüber dem Einsatz von Rohstoffen aus dem Materialkreislauf nicht abgeneigt. Die Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. hat sich in zahlreichen Projekten zur Optimierung der Verwertung der Kalksandsteine, aber auch der Frage des Rückgriffs auf Recyclingmaterialien beschäftigt. In der Praxis werden bislang ausschließlich Produktionsrückstände und Fehlchargen als Substitut von primären Rohstoffen eingesetzt. Der bisher ausschließliche Einsatz dieser sortenreinen Fraktionen sichert die Erreichung der geforderten Produktqualitäten der Norm EN 771-2 [20], welche die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von Kalksandsteinen festlegt. Bislang lassen sich Anteile von maximal 10% sortenreines KS-Recyclingmaterial der Produktion zuführen.

Es gab ein Forschungsprojekt, in dem die Produktionslinien mit aufbereitetem Abbruchmaterial beschickt wurden und ein Recyclingstein hergestellt wurde. Im Ergebnis zeigten sich gegenüber konventionell hergestelltem Kalksandstein Abstriche in der Produktqualität. Die Produktionsprozesse wurden jedoch nicht auf die geänderten Rohstoffqualitäten umgestellt, was wesentlich die Ergebnisse beeinflusst haben dürfte. [21]

An den verschiedenen Produktionsstandorten sind die Rezepturen auf die Rohstoffversorgung und die Eigenschaften der Sande ausgerichtet. Sande werden nicht nur aus Sand- oder Kiesgruben bezogen. Es werden bspw. auch in Steinbrüchen anfallende Brechsande verwendet. Dies sind grundsätzlich keine ungünstigen Rahmenbedingungen, die Produktion kann grundsätzlich und in gewissem Umfang auf die spezifischen Eigenschaften der Sande aus dem Materialkreislauf ausgerichtet werden.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden ein intensiver Austausch mit Kalksandsteinproduzenten aus dem Südwesten sowie der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. gesucht. In diesem Zusammenhang wurden auch Materialproben übergeben. Die Beprobung erfolgte mittels grober Sichtung, Untersuchung unter dem Mikroskop sowie über eine Röntgenfluoreszenzanalyse. Im Ergebnis zeigte sich, dass die in der Nassklassierung gewonnenen Sande für die Kalksandsteinproduktion ungeeignet sind.

Die Sande sind aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung technisch nicht geeignet. Als problematisch erwiesen sich die zu hohen Gehalte an Magnesiumoxid, das in Kombination mit Wasser zum Magnesiatreiben führen kann und einer damit zusammenhängenden

Volumenvergrößerung [22]. Diese Reaktion ist auch ein Grund für die Begrenzung von MgO in Zementen und damit in den Betonen.

Problematisch sind zudem die Gehalte an Schwefeltrioxid SO_3 , das stark mit Wasser reagiert und Korrosionsproblemen an den Produktionsanlagen führen kann.

Problematisch sind zudem die Gehalte der Alkalien K_2O und Na_2O , die die Hydrothermalhärtung bei der Synthese der Bindemittelphasen (Bildung von CSH-Phasen) stören und damit den entscheidenden Prozess in der Kalksandsteinproduktion.

Fazit

Für den Einsatz in der Kalksandsteinindustrie müssen die Sande frei von organischen Bestandteilen sein. Das sind nicht nur Fremdstoffe (Holz, Kunststoffe), sondern auch humose Anteile in Böden. Zudem müssen abschlämbare Anteile verlässlich ausgeschlossen sein. Diese durch die Aufbereitungstechnik zu beeinflussenden Rahmenbedingungen wurden erreicht, hier wären im Zweifel auch noch Anpassungen möglich gewesen.

Die Sande erwiesen sich aber aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung als ungeeignet, was sich kaum beeinflussen lässt. Die chemische Zusammensetzung resultiert aus den Eigenschaften der Böden im Input der Anlage. Dies deckt sich mit den Ergebnissen, die im Teilvorhaben von IAB gewonnen wurden. Die Untersuchungen kamen hier zur Aussage, dass die Zusammensetzung der untersuchten Sande kaum Ähnlichkeiten mit der chemischen Zusammensetzung von handelsüblichen Kalksandsteinen aufweisen.

Auch wenn es eine Vielzahl von Herstellern und Produktionsstandorten für Kalksandsteine gibt, befindet sich im Standortumfeld der Nassklassierung ein Werk, das kein Interesse an der Einbindung von Rohstoffen aus dem Materialkreislauf bzw. der Aufbereitung von Böden signalisierte. Der Produktionsstandort kann auf eigene Rohstoffe aus dem Standort zurückgreifen, die zudem als Brechsande als Nebenprodukt der eigentlichen Produktion des Steinbruchs anfallen.

4.7 Optionen aus der Verwertung der Schlufffraktion

Einsatz in der Ziegelindustrie

Ziegel lassen sich grob in Mauerziegel und Dachziegel unterteilen. In der Ziegelindustrie werden – oftmals empirisch – Mischungen aus verschiedenen Ausgangsmaterialien hergestellt, die im Laufe von Jahren ermittelt wurden. Hierzu bestehen produktabhängige allgemeine Erfahrungswerte für günstige Korngrößen- und Mineralzusammensetzungen, wobei aus ziegeltechnischer Sicht generell eine möglichst ausgewogene Kornverteilung angestrebt wird. Bereiche günstiger Korngrößenzusammensetzung für unterschiedliche Produkte zeigt nachfolgende Abbildung.

Traditionell hat sich die Ziegelindustrie in unmittelbarer Nachbarschaft zu den Tonvorkommen und damit den Rohstofflagern aufgestellt. Diese unterscheiden sich. So gibt es eher fette Tone und eher magere Vorkommen. Je nach Produktionsziel müssen die übrigen Rezepturbestandteile auf diese Eigenschaften hin abgestellt werden. Jeder Produktionsstandort ist damit in seinen Prozessen und Rezepturen auf die spezifischen Eigenschaften des entsprechenden Rohstoffes hin ausgerichtet.

Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass auch sekundäre Rohstoffquellen gleichbleibende Eigenschaften liefern müssen. Die Produktionsprozesse würden auf diese Eigenschaften hin ausgelegt. Entscheidend ist damit bspw. weniger ein bestimmter Tongehalt, sondern die Gewährleistung gleichbleibender Zusammensetzung und Eigenschaften auch über einen großen Massenstrom hinweg. Dies zu gewährleisten dürfte aufgrund der Aufbereitungstechnik bei der Fa. Feess tendenziell möglich sein.

Zudem gab es in der Vergangenheit auch Ziegeleestandorte, die nur über extern bezogene Rohstoffe versorgt wurden. Dies und die Tatsache, dass auch natürliche Vorkommen und Lagerstätten in gewissem Rahmen schwankende Eigenschaften aufweisen, könnte ein Hinweis darauf sein, dass die geforderte Homogenität des Rohstoffes unter Berücksichtigung gewisser tolerabler Schwankungsbreiten zu sehen ist.

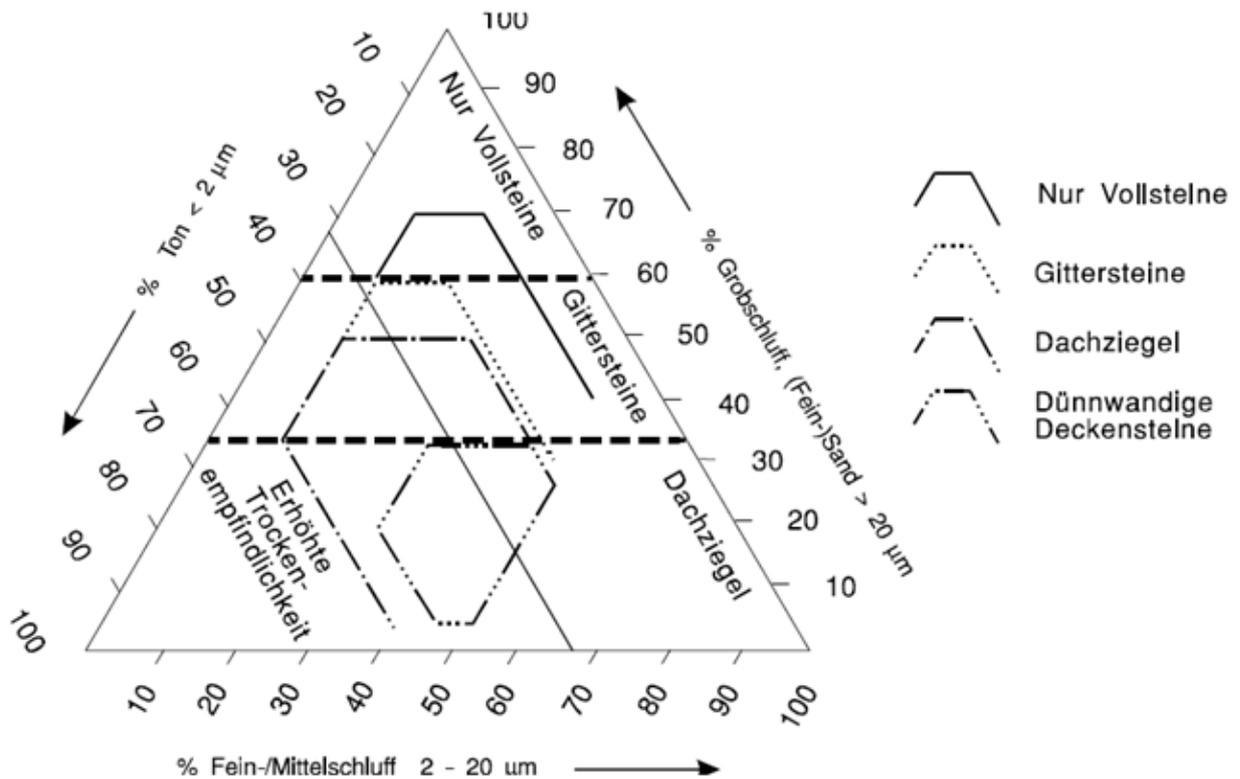


Abbildung 31: Abgrenzung der Bereiche günstiger Korngrößenzusammensetzung von Ziegeltonen [23]

Die Meldung: Ziegelwerke verwenden Erdaushub als Rohstoff aus EUWID (15/2018) zeigt jedoch, dass Ziegelwerke unter bestimmten Rahmenbedingungen auch auf Böden zurückgreifen können, die nicht ihren Rohstofflagerstätten gezielt entnommen wurden, sondern als Bodenaushub von Baugruben zur Entsorgung anfielen. Der Ziegelhersteller Leipfinger-Bader [24] bieten das auch gezielt als Service-Leistung für das Umfeld ihrer Produktionsstandorte an. Die Aushubmassen werden zuvor vor Ort auf Eignung geprüft.

Nach unserer Kenntnis wurden auch Versuche mit Hafenschlick als Rohstoff durchgeführt und dies mit durchaus positiven Ergebnissen. Auch Hafenschlicke lassen sich in ihrer Zusammensetzung aufgrund der großen Flusseinzugsbereiche und anthropogene Quellen mit Sicherheit nur über Bandbreiten beschreiben. Neben der Kornabstufung werden der Tonerdegehalt, die als Flussmittel wirkenden Bestandteile, der den Farbton bestimmende Eisenoxid-Gehalt (sowie Quarz, Feldspat, Hornblende) sowie die störenden Bestandteile wie Sulfate und Sulfide von Interesse sein.

Tabelle 25: Mineralbestand einiger Ziegeltonen und -lehme [25]

Rohstoff	Tonminerale (%)						andere Minerale (%)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Kaolin, Hirschau	80						10	8							2
Fire clay, Klardorf		75		5			20								
Ca-Bentonit, Geisenhm.	8		70	13			8								1
Illit-Ton, Eisenberg	8			75			8	5							4
Taunus-Sericit	8				50		40								2
Seplarien-Ton	10			15		5	45	4		4			3	3	11
Wealdenton		20	3	15		5	45	5				3	3		1
Oligozänton		15	5	15		8	30	8		5	3	3			8
Tertiär-Lehm		10		10			50	5		5			2		18
Diluvial-Lehm		20		13			45	8		4	5				5
Diluvial-Lehm		15	3	12		5	40	5		3					17
Lehm, sandig		5	5	13		5	58	8					4		2
Schluff-Lehm		8			20	3	50	8		2			3		6
Mergelton		10		10			50	15		10	3				2
Mergelton		10		10		5	38	3		20					14
Keupermergel	8		4	8			40	13		4	5				18
Lias-Schieferton		35		13			30	4		7					11
Schieferton	20			15			40	4		5			3		13
Tonstein		5		40		5	30	3				5			12
Ziegelton, plastisch	20			20			50	3							7
Steinzeugton	22			18	13		37	5				5			
Steinzeugton	22			15	10		53								
Löß	10 - 20						60 - 70			10 - 30					

1 = Kaolinit, 2 = Kaolinit-Fire clay, 3 = Montmorillonit, 4 = Illit + Sericit, 5 = Sericit, 6 = Chlorit, 7 = Quarz, 8 = Feldspat, 9 = Glimmer/Muskovit, 10 = Calcit, 11 = Dolomit/Ankerit, 12 = Hämatit + Goethit, 13 = Pyrit + Siderit, 14 = Gips, 15 = röntgenamorpher Rest

In der Praxis der Ziegelbetriebe sind als wesentliche Voraussetzung zur Beurteilung der Rohstoffe folgende Parameter zu ermitteln:

- die Korngrößenverteilung
- die mineralogische Zusammensetzung
- die chemische Zusammensetzung
- der Wassergehalt

Die Korngrößenverteilung wird nach Hatzl & Gehlken, 2001 [26] über Sedimentationsverfahren und Lasergranulometrie für die Korngröße < 2 µm, 2-20 µm, > 20 µm bestimmt. Nicht die durchschnittliche Korngröße, sondern die Zusammensetzung der einzelnen Fraktionen im Ton bestimmen die Eigenschaften.

Die mineralogischen und chemischen Zusammensetzungen stehen in Korrelation. Die chemische Zusammensetzung resultiert herkömmlicherweise aus der mineralogischen Zusammensetzung der Rohstoffe. Nach (Hatzl & Gehlken, 2001) [26] sind aufgrund der möglichen Mineralzusammensetzung der Rohstoffe (s.o.) folgende Elementoxidparameter besonders hervorzuheben:

- SiO₂ muss auf alle Silikatbestandteile (Quarz, Tonminerale, Feldspäte etc.) aufgeteilt werden und stellt für sich allein keinen spezifischen Parameter zur Rohstoffkontrolle dar.
- Al₂O₃ (+ TiO₂ = „Tonerdegehalt“) spiegelt im Wesentlichen den Tonmineralgehalt wider. Bei fast reinen Kaolinittonen sind Al₂O₃-Gehalte bis zu 40 Gew.-% möglich. Allerdings sind u.a. auch Feldspäte (Vorläufer der Tonminerale), sofern diese noch nicht vollständig abgebaut sind, für die Al₂O₃-Gehalte verantwortlich.
- CaO- und MgO-Gehalte wirken vor allem als Flussmittel und reagieren beim Brand mit den Silikaten des Rohstoffs. CaO und MgO sind in erster Linie den Karbonaten zuzurechnen, aber

auch Plagioklase und Smektite (CaO) sowie Chlorite, Smektite und Glimmerminerale (MgO) bauen diese Bestandteile in ihr Kristallgitter ein.

- Die Alkalioxide K_2O und Na_2O kommen vor allem in Feldspäten (Kalifeldspäte, Albit), in Glimmermineralen (Illit, Serizit, Muskowit) und untergeordnet Smektiten (Montmorillonit) vor. Die Alkalioxide wirken beim Ziegelbrand als Flussmittel und führen daher zu entsprechender Erniedrigung der Schmelzpunkte.
- Der Fe_2O_3 -Gehalt stellt einen entscheidenden Parameter zur Färbung (Grad der Rotfärbung) dar. Je nach CaO-Gehalt kann die Färbung des Produkts bereits aus der chemischen Analyse abgeschätzt werden.
- Bei den Spurenelementen sind vor allem Fluor, Chlor, Schwefel und Vanadium zu beachten, da hier sowohl die Ofenatmosphäre (Umweltauflagen) als auch die Ziegelprodukte (Ausblühungen) stark beeinträchtigt werden können.
- Sulfate und Sulfide sind generell unerwünschte mineralische Bestandteile, da spätere Ausblühungen im Produkt entstehen können und SO_2 - und SO_3 haltige Abgase das Produkt und die Anlagen belasten können.
- Die Ermittlung der Feuchte und des strukturell gebundenen Wassers erfolgt ergänzend zur chemischen Analyse. Hierbei dient die Ermittlung des Trocknungsverlustes der Ermittlung des Anmachwassers. Der Glühverlust (bei $1050^\circ C$) andererseits gibt Aufschluss über den ausgeglühten organischen Anteil, strukturell gebundenes Wasser (z. B. Hydroxylgruppen vieler Mineralphasen, v. a. Tonminerale oder Kristallwasser in Gips) sowie den Verlust von CO_2 der Karbonatanteile.
- Dehnungs- und Schwindungsverhalten sowie exo- und endotherme Reaktionsmechanismen beim Tempern (routinemäßig bei $1100^\circ C$) lassen ebenfalls Rückschlüsse auf die stoffliche Zusammensetzung des Rohstoffs zu und geben gleichzeitig direkte Hinweise auf die Eigenschaften des Rohstoffs beim Ziegelbrand.

Vor diesem Hintergrund wurden Proben aus der Outputmasse Lehm und Ton entnommen und bei IAB in Weimar analysiert. Die entsprechenden Ergebnisse sind im Bericht für dieses Teilvorhaben beschrieben und erläutert.

Vor diesem Hintergrund wurde der direkte Kontakt mit der Ziegelindustrie gesucht. Unter anderem wurde Kontakt zum Ziegelhersteller Leipfinger – Bader aufgenommen, welcher offen mit dem Einsatz von Böden als Rohstoff wirbt. Die Standorte dieser Ziegelwerke befinden sich jedoch alle in relativ großer Entfernung zum Standort der Aufbereitungsanlage in Kirchheim/Teck, so dass dieser Austausch für die Industrie eher ohne konkreten Praxisbezug erfolgte. Die ehemals auch in der Region östlich von Stuttgart vorhandenen Ziegelwerke existieren nicht mehr. Eine Ausnahme bildet ein Werk auf den Fildern, das aber nur quasi als Manufaktur produziert und hier auf Anforderung für denkmalpflegerische Aufgaben. Wie das Unternehmen rückmeldete, sind die Anforderungen an die Produkte und damit auch den Rohstoff so hoch, dass hier nur bestimmte fette Tone definierter Qualität eingesetzt werden können und aus größerer Distanz bezogen werden müssen.

Wie die Analysen des Projektpartners IAB aus Weimar zeigten, und in dem entsprechenden Forschungsbericht dokumentiert sind, kommen die Schluffe in ihren Gehalten an Al_2O_3 und SiO_2 nicht wirklich der chemischen Zusammensetzung handelsüblicher Ziegel nahe. Hier wurden Probematerialien aus der Aufbereitung von Boden-Bauschuttmischungen und Gleisschotter analysiert.

Darüber hinaus wurden weitere Proben den zentralen Laboren zweier Ziegelhersteller übergeben und diese um ein Screening und eine erste Eignungsprüfung gebeten. Untersucht wurde Material der RBB4. Die Rückmeldung der beiden Werke war unisono: das Material ist als Rohstoff grundsätzlich nicht

ungeeignet. Sein Einsatz ist jedoch mit keinen Vorteilen verbunden. In Kombination mit dem hohen Feuchtegehalt wird von einer Verwendung abgeraten.

Im Einzelnen ergaben sich folgende Probleme:

- Das Material wies mit 35% einen sehr hohen Wassergehalt auf. Die Produktion von Ziegeln ist mit einem hohen Energieeinsatz verbunden, der sich zum einen aus dem Brennvorgang mit hohen Temperaturen selbst ergibt, zum anderen aber auch aus der vorangehenden Trocknung. Wassergehalte im Rohstoff sind daher sowohl ökologisch als auch ökonomisch bestimmende Randfaktoren.
- Das Material ist grobschluffig mit 33% Feinstkorn und 41% Schluff und weist damit einen tendenziell zu hohen Anteil an gröberen Bestandteilen und Sand auf. Die Trennung Sand / Schluff funktioniert mit der in Kirchheim/Teck eingesetzten Technologie nur unzureichend.
- Das Material weist mit 29% zudem einen sehr hohen Kalkgehalt auf, was es in Kombination mit der Grobstückigkeit für die Produktion ungeeignet macht. Schon bei niedrigen Brenntemperaturen kommt es zu einem Kalkzerfalle und damit Schäden im Produkt.
- In den Laboren fiel außerdem der erhöhte Anteil an organischem Kohlenstoff (TOC) auf und die Schaumbildung bei der Siebanalyse. Beides dürfte möglicherweise auf das in der Aufbereitung eingesetzte Fällmittel zurückzuführen sein.

Nach Einschätzung der Ziegelindustrie sind die Materialien daher nur als Magerungsmittel geeignet und zwar bei der Produktion von Hintermauerziegeln. Dies aber nur dann, wenn eine Optimierung der Aufbereitungstechnik die sichere Abtrennung des groben Kalkes und eine deutliche bessere Entwässerung mit niedrigeren Wassergehalten gewährleistet.

Fazit

Wie man aus den Ausführungen entnehmen kann, ist das Material in der derzeit vorliegenden Form nicht als Rohstoff für die Ziegelindustrie geeignet. Der Rohstoff ist zu mager und damit nur als Magerungsmittel verwendbar. Er ist zu grob, was in Verbindung mit dem hohen Kalkgehalt zu Schäden in der Produktion führt, und er ist zu nass, was die Produktionskosten erhöht.

Technisch lösen lassen sich hier grundsätzlich die bessere und schärfere Abtrennung der Korngruppen Sand und Schluff und die Entwässerung des Materials. Der hohe Kalkgehalt und eventuell auch der geringe Tongehalt sind geogen bedingt und lassen sich bei diesem Standort kaum beeinflussen.

Die Untersuchungen und vor allem auch der im Rahmen des Projektes erfolgte intensive Austausch mit der Ziegelindustrie zeigte aber zum einen deren großes Interesse an der Erschließung von Böden als Rohstoffquelle und zum anderen die grundsätzliche Möglichkeit, aus der Klassierung von Böden für die Ziegelindustrie geeignete Rohstoffe zu produzieren. Die Aufbereitungstechnik müsste jedoch auf deren Erfordernisse hin angepasst werden und es gilt einen Standort zu wählen, der in seinem geogenen Umfeld insbesondere geringere Kalkgehalte sicherstellt.

Verwendung als Rohstoff im Lehmbau

Lehm ist eine Mischung aus Sand (Korngröße > 63 µm), Schluff (Korngröße > 2 µm) und Ton (Korngröße < 2 µm) und ist einer der ersten Baustoffe der Menschheitsgeschichte. Unterschieden werden je nach Entstehung Berglehm, Gehängelehm, Geschiebelehm (Gletscher), Lösslehm (Löss) und Auenlehm (aus Flussablagerungen). Die Mischungsverhältnisse von Sand, Schluff und Ton können bei diesen natürlichen Vorkommen innerhalb definierter Grenzen schwanken. In kleinen Mengen kann noch gröberes Material (Kies und Steine) darin enthalten sein. Lehm mit nennenswertem Gehalt an Kalk, etwa in Folge wenig fortgeschrittener Verwitterung oder bei der Entstehung durch Ablagerung kalkigen Materials, wird als Mergel bezeichnet. Tonreiche Lehme werden als fett bezeichnet, tonarme als mager. Zu fetter Lehm kann mit Sand abgemagert werden.

Zur Herstellung von Lehmbaustoffen wird demnach im Prinzip auf die gleichen Materialien und Rohstoffspezifikationen zurückgegriffen, wie zur Herstellung von Ziegelbaustoffen. Für diese werden die Rohstoffe jedoch gebrannt, für die Lehmbaustoffe nur luftgetrocknet. Dies bedeutet, dass man auf Aussagen und Erkenntnisse zu Ziegelbaustoffen zurückgreifen kann. Die Verwendung als Lehmbaustoff dürfte tendenziell allerdings größere Bandbreiten in den Rohstoffzusammensetzungen und –eigenschaften zulassen, da den Brennvorgang störende oder das Farbbild beeinflussende Stoffe nicht in dem Maße beachtet werden müssen. Auch ist der Wassergehalt keine die Eignung vergleichbar bestimmende Größe.

Da die Herstellung von Lehmbaustoffen im Vergleich zu anderen Baustoffen energiesparend ist und da Lehmbaustoffe u.a. feuchtigkeitsregulierende und schadstoffbindende Eigenschaften aufweisen, erleben diese derzeit eine kleine Renaissance. Nach dem Dachverband Lehm e.V. [27] werden Lehmbaustoffe folgendermaßen definiert: Lehmbaustoffe sind ungeformte oder geformte Baustoffe aus ungebranntem Lehm mit oder ohne Zuschläge. Lehmbaustoffe sind dadurch gekennzeichnet, dass sie durch Austrocknen fest und jederzeit durch Feuchtigkeitsaufnahme wieder weich werden. Durch die Zugabe von Zuschlägen mineralischer oder pflanzlicher Herkunft kann die Trockenschwindung und Rissbildung verringert, die Zug-, Druck- bzw. Abriebfestigkeit erhöht oder die Wasserempfindlichkeit herabgesetzt werden. Leichtzuschläge verbessern die wärmedämmenden Eigenschaften. (DVL Dachverband Lehm e. V., 2017) unterteilt in folgende Lehmbaustoffe:

Stampflehm ist feinkrümelig und erdfeucht aufbereiteter Lehmbaustoff, der nach Verdichtung und Austrocknung Rohdichten zwischen 1.700 und 2.200 kg/m³ erreicht. Er ist damit der "schwerste" Lehmbaustoff. Stampflehm kann deshalb zu tragenden Lehmbauteilen verarbeitet werden, und zwar mittels Schalung und lagenweisem Einbau analog dem monolithischen Betonbau oder durch Herstellung von Lehmsteinen nach verschiedenen Verfahren, die nach den Regeln des Mauerwerksbaus verarbeitet werden.

Die im traditionellen Lehmbau als "Stampflehm Bauweise" bekannte Form des monolithischen Lehmbaus ist in Deutschland über Jahrzehnte nicht mehr ausgeführt worden, erreicht aber in jüngster Zeit mit einigen außerordentlich attraktiven Projekten, z.B. der Kapelle der Versöhnung in Berlin, einigen weiteren bemerkenswerten Kirchenbauten bis hin zum Einsatz im Wohnungsneubau eine spektakuläre "Auferstehung". Im Südwesten hat auch der Neubau von Alnatura in Darmstadt⁹ Aufmerksamkeit gefunden. Inzwischen wird der Stampflehm in Deutschland auch preiswerter und handlich als vorgefertigtes Wandelement angeboten. In Ländern wie Australien und den USA gehört der Zusatz von Zement zum Stampflehm zur täglichen Lehmbaupraxis.

⁹ <https://www.alnatura.de/de-de/ueber-uns/alnatura-campus/licht-und-lehm>

Der Wellerlehm ist im traditionellen Lehmbau ebenfalls in einer eigenständigen Bauweise, als "Lehmwellerbau", verarbeitet worden. Vom Stampflehm unterscheidet er sich durch den Zuschlag von Stroh, wodurch der Wellerlehm mit einem Rohdichtebereich von 1.500 bis 1.800 kg/m³ auch "leichter" ist. Er wurde ebenfalls zu tragenden Wandkonstruktionen verarbeitet. Im Gegensatz zur Stampflehm-Bauweise ist die Verarbeitung von Wellerlehm zu Wandkonstruktionen i.d.R. nicht schalungsgebunden. Er wird freihändig mit der Gabel zu Schichten von ca. 80 cm Höhe bis zum Erreichen der vollen Bauwerkshöhe aufgesetzt. Die Oberflächen werden glatt abgestochen. Zwischen den einzelnen Lagen sind Trockenzeiten erforderlich. Wellerlehm wird heute allenfalls bei der Reparatur bestehender Gebäude verarbeitet.

Stroh- oder Faserlehme sind Mischungen aus aufbereitetem Baulehm und pflanzlichen Faserstoffen, vorwiegend Stroh. Nach Verarbeitung und Austrocknung weisen Bauteile oder Baustoffe aus Strohlehm Rohdichten zwischen 1.200 und 1.700 kg/m³ auf. Strohlehm wird in plastischer Konsistenz verarbeitet und heute vor allem im Sanierungsbereich, z.B. bei der Fachwerkausfachung, angewendet. Strohlehm kann heute als lose Fertigmischung oder zu Steinen oder Platten verarbeitet bezogen werden.

Aufbereiteter Baulehm wird in breiig bis flüssiger Konsistenz mit organischen oder mineralischen Leichtzuschlägen zu Leichtlehm gemischt. Als organische Zuschläge kommen vor allem Stroh und Holzhackschnitzel, als mineralische Zuschläge thermisch geblähte Materialien (Blähton, Blähschiefer u.a.) zum Einsatz. Bauteile und Baustoffe aus Leichtlehm erreichen deshalb nach Verarbeitung und Austrocknung einen Rohdichtebereich von 400 bis 1.200 kg/m³. Dadurch verbessern sich vor allem deren wärmedämmende Eigenschaften. Durch den hohen Anteil von Leichtzuschlägen sind die erreichbaren Druckfestigkeiten entsprechend niedrig, so dass eine Verarbeitung von Leichtlehm i.d.R. auf den nicht tragenden, raumumschließenden Bereich in Kombination mit einem Tragskelett, meist aus Holz, beschränkt bleibt. Darüber hinaus bildet vor allem der Bereich der Bausanierung ein bevorzugtes Einsatzfeld für Leichtlehme.

Leichtlehme können heute als lose Fertigmischung oder zu Steinen oder Platten geformt in unterschiedlichen Rohdichteklassen bezogen werden. Leichtlehme werden auch nach ihrem dominanten Zuschlagstoff bezeichnet, z.B. Strohleichtlehm.

Lehmmörtel sind mit feinkörnigen und / oder feinfaserigen Zuschlagstoffen gemagerte Baulehme. Für werkmäßig hergestellte Lehmmörtel gelten die DIN 18946 – Lehmmauermörtel [28] bzw. DIN 18947 – Lehmputzmörtel [29]. Alle Lehmmörtel stehen heute in einer großen Vielfalt an Rohdichteklassen, Zuschlagstoffen und Farben als Fertigprodukt in verschiedenen Verpackungsformen zur Verfügung. Da Lehmmörtel nicht abbinden, können diese auch erdfeucht in größeren Einheiten und damit preisgünstiger geliefert werden und bis zur Verarbeitung längere Zeit lagern. Sie lassen sich unterschiedlich verwenden: Lehmspritzmörtel werden zur Ausfachung von Fachwerkkonstruktionen, zur Erstellung von Vorsatzschalen und Innenwänden oder als Deckenfüllung eingesetzt. Sie werden mit mineralischen und / oder maschinengängigen organischen Leichtzuschlägen gemagert und wie Spritzputz ggf. mehrlagig bis zur Ausfüllung des Hohlraums bzw. bis zum Erreichen der vorgesehenen Dicke aufgetragen.

Lehmputzmörtel werden zum Verputz von Wand- und Deckenoberflächen im Innenbereich oder auch auf Schlagregen geschützten Außenwandoberflächen eingesetzt. Sie werden mit Sand, Stroh oder anderen pflanzlichen Faserstoffen gemagert. Die Faserstoffe übernehmen im Putz eine armierende Wirkung und beugen so einer Rissbildung nach Auftrag und anschließender Austrocknung vor. Wegen der die Luftfeuchte regulierenden Wirkung im Innenraum werden Lehmputze heute besonders geschätzt.

Lehmsteine können durch verschiedene Verfahren der Formgebung aus den o.g. ungeformten Lehmstoffen hergestellt werden. Für werksmäßig hergestellte Lehmsteine gelten die DIN 18945 – Lehmsteine [30]. Demnach sind insbesondere die Anwendungsklassen der auf den Markt gebrachten Lehmsteine zu deklarieren und einzuhalten. Zur Gewährleistung der Formstabilität der Lehmsteine bei Transport und Verarbeitung müssen die eingesetzten Baulehme von ihrer Bindekraft her mindestens als mager klassifiziert werden. Im Prinzip handelt es sich um die Grünlinge aus der Ziegelproduktion, die nach dem Strangpress-Verfahren hergestellte Steine für die Ziegelindustrie. Sie besitzen auf Grund ihrer hohen Verdichtung und ihres sehr feinkörnigen Mineralgerüsts eine hohe Rohdichte. Sie reagieren sehr empfindlich auf Feuchtigkeit, ihre Anwendung ist deshalb auf den nicht tragenden Innenbereich, z.B. als Decken- oder Wandfüllungen, begrenzt. Durch ihre große Speichermasse wirken sie Temperatur regulierend im Innenraum, was vor allem in den Übergangszeiten und bei Temperaturspitzen erwünscht ist.

Lehmplatten werden im Trockenbau eingesetzt. Mit einer Stärke ≤ 50 mm sind sie nicht selbst tragend und erfordern eine Unterkonstruktion. Lehmplatten mit einer Stärke > 50 mm (üblich 80 – 125 mm) sind selbst tragend und erfordern keine Unterkonstruktion. Sie werden deshalb in wachsendem Umfang im Trockenbau für nicht tragende Trennwände eingesetzt. Darüber hinaus ist ihr Einsatz bspw. im Fußboden- oder Deckenaufbau möglich.

Für Lehmsteine, Lehmmauermörtel und Lehmputzmörtel wurden 2013 vom Deutschen Institut für Normung drei neue DIN-Normen in denen Begriffe, Anforderungen und Prüfverfahren definiert sind festgelegt. Die Normen gelten nur für im Werk hergestellte Lehmstoffe. Wird Lehm hingegen auf der Baustelle gemischt – im Idealfall mit dem auf dem Grundstück gewonnenen und ob seiner Eignung geprüften Lehm der Baugrube –, dann gelten weiterhin die Lehmregeln des DVL (Dachverband Lehm e. V.), die erstmals 1998 veröffentlicht wurden.

Sowohl die Lehmregeln als auch die neuen DIN-Normen des Lehmbaus schließen Baustoffe aus, die aus Lehm und zusätzlich noch anderen Bindemitteln, wie Gips oder Zement, bestehen. Derartige Baustoffe sind keine Lehmstoffe im Sinne der Lehmregeln und DIN-Normen des Lehmbaus. Anderslautende – durchaus kursierende – Bezeichnungen für derartige Hybridprodukte sind unzulässig.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden bei IAB in Weimar keine gesonderten Untersuchungen durchgeführt, es wurde aber der Austausch mit Herstellern und Anwendern gesucht. Dies waren keine industriellen Hersteller, die Lehmbranche ist handwerklich strukturiert. Es gibt bundesweit knapp 20 Hersteller, die auf regional anfallenden Lehm zurückgreifen und dabei möglichst auf Massen vor Ort, die aus Aushub zur Entsorgung anfallen. Dies gilt auch für Martin Rauch aus Vorarlberg, der mit seinem Unternehmen Lehm – Ton – Erde – Baukunst¹⁰ für den Lehmbau wesentliche Impulse gesetzt hat. Es gibt jedoch auch industrielle Hersteller von Fertigprodukten wie Putze bis hin zu Wandelemente für den Innenausbau.

Die kleinen Hersteller stehen dabei im Kontakt mit den Erdbauunternehmen aus der Region, die auf für die Verarbeitung potenziell geeigneten Lehm hinweisen. Auch hier erfolgt eine vor allem visuelle Erstuntersuchung vor Ort. Für die Anlieferung im Unternehmen wird ein kleiner Betrag vergütet – für den Erdbauunternehmer ein großer Anreiz, da sich bindige Böden ansonsten nur im Rahmen von Verfüllungen oder auf Deponien zu relevanten Kostenbeiträgen ablagern lassen. Das Material wird dann intensiver auf Eignung untersucht bzw. nach Eigenschaften eingeordnet. Parameter sind: Tonanteil, vorherrschendes Tonmineral, Gehalte an Salzen, Schwermetallen und Radon sowie

¹⁰ <http://www.lehmtonerde.at/de/>

Erkenntnisse aus der Texturanalyse. Illite bspw. sind sehr geeignete Tonminerale. Verwendet wird nur Unterboden, d.h. der Boden muss zwingend frei sein von Organik.

Der Produktionsprozess, die Verarbeitung von Rohlehm zu Produktionslehm, erfolgt in diesen kleinen Betrieben folgendermaßen. In Ziegeleien erfolgt dies über Kollergänge. Manche der Lehmbaustoffhersteller greifen für diesen Verarbeitungsschritt auf Ziegeleien als Dienstleister zurück bzw. der Ton wird als Rohstoff von dort fertig verarbeitet bezogen. Die Alternative dazu ist ein Verfahren, das die Fa. ProLehm¹¹ entwickelt hat: das Material wird im ersten Schritt mit Wasser aufgeschlämmt, dann fermentiert, um es dann sedimentieren zu lassen.

Versuche bei einem kleinen Lehmbauunternehmen aus der Standortregion zeigen, dass sich das in der Nassklassierung von Böden gewonnene Material grundsätzlich sehr gut ("erschreckend gut") als Rohstoff für die Herstellung von Lehmbaustoffen oder auch Lehmputzen eignet. Die technischen Eigenschaften passen. Resultierend aus dem Aufbereitungsprozess (Nassklassierung von Böden) und der gewählten Technik hat der Lehm jedoch eine merkliche organische Belastung, die aus dem Einsatz von Flockungs- und Fällungsmitteln rührt. Lehm wird als Naturbaustoff vermarktet. Unabhängig vom tatsächlichen (eher vernachlässigbaren) Expositionsprofil, stößt dies auf Vorbehalte (Schadstoffbelastung) beim Endkunden.

Fazit

Soll dieser Verwertungsweg von Böden in der Praxis umgesetzt werden, muss auf unbelasteten Bodenaushub zurückgegriffen werden. Lehme aus der Aufbereitung von Gleisschotter sind wegen der Schadstoffgehalte nicht geeignet. Um einen Schadstoffeintrag aus der Aufbereitung zu vermeiden, müsste die Entwässerung umgestellt bzw. andere anorganische Fällmittel eingesetzt werden.

Ansonsten sind die spezifischen Anforderungen an den Rohstoff Lehm vergleichsweise gering. Wie die Rückmeldung aus Versuchsanwendungen zeigte, stimmen die Materialien mit den Spezifikationen überein. Der Rückgriff auf derartige Materialien aus der Kreislaufwirtschaft passt zudem sehr gut in das Idealbild der Lehmbaustoffproduzenten.

Herstellung von Flüssigböden bzw. Bodenmörtel

Flüssigboden oder Bodenmörtel sind Erdbaustoffe, mit denen Hohlräume gefüllt werden können. Der Baustoff ist zeitweise fließfähig und pumpfähig, selbstverdichtend und damit selbstnivellierend. Die Rezepturen können auf eine gewünschte Wärmeleitfähigkeit und Wasserdurchlässigkeit hin einstellbar. Die Bodenmörtel sind mit Bodenklasse 4-5 nach DIN 18300 lösbar, so dass die eingebetteten Leitungen jederzeit mit geringem mechanischem Aufwand erneut zugänglich sind.

Der Baustoff wird vor allem für das Verfüllen von Hohlräumen propagiert, bei denen sich die Erdmassen konventionell nicht oder nur aufwändig verdichten lassen. Dies sind Leitungsgräben vor allem in städtischen Bereichen mit einer Vielzahl unterschiedlicher sich ggf. auch kreuzender Leitungssysteme. Dies sind aber auch Tanks, Stollen, Keller, für die nur mit einem Flüssigboden ein kraftschlüssiger Abschluss möglich ist. Flüssigböden eignen sich aber auch für die Verfüllung von Arbeitsräumen in Baugruben und hier gerade auch im historischen Gebäudebestand, der auf Erschütterungen empfindlich reagieren könnte. Da sich die Wasserdurchlässigkeit einstellen lässt, können damit aber auch Abdichtungen und Trennschichten für den Hochwasserschutz oder Rückhaltebecken errichtet werden.

Im Idealfall lassen sich die bei den Baumaßnahmen anfallenden Böden vor Ort aufbereiten und wieder einsetzen. In der Praxis erfolgt dies allerdings nur bei großen Baumaßnahmen, die mobile

¹¹ <http://www.prolehm.com/>

Aufbereitungsanlagen wirtschaftlich machen. Zum anderen müssen Rezepturen auf die Eigenschaften der Böden abgestimmt werden, was einen zeitlichen Vorlauf von etwa 4 Wochen benötigt. In der Praxis dürften bei der Vielzahl kleiner Baumaßnahmen im kommunalen Straßenbau daher vor allem fertig angelieferte Bodenmörtel infrage kommen.

Eine zentrale stationäre Aufbereitung von Böden zu Bodenmörtel oder Flüssigboden hat damit durchaus seine Berechtigung. Es werden ausreichend Zwischenlagerflächen benötigt, um die Böden nach Bodenarten getrennt lagern und gezielt zu Mischungen verarbeiten zu können. Dies gilt insbesondere bei einer konventionellen trockenen Mischung. Wahrscheinlich werden aber auch für die Nassklassierungen Vorsortierungen benötigt.

Flüssigboden ist ein Materialstrom bzw. Produkt, das auf Böden aber in Anteilen auch auf bodenähnliche Materialien aus dem Recycling wie bspw. Vorsieb zurückgreifen kann. Das Produkt Flüssigboden ist noch nicht weit verbreitet, hat aber die letzten Jahre deutlich Aufmerksamkeit erregt. Bis dato gibt es kein abschließendes Regelwerk. Die FGSV Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen hat ein Hinweisblatt [31] herausgegeben, das die Grundlage für das Regelwerk bilden wird. Es gibt auch zwei Gütesicherungssysteme (<http://www.bqf-fluessigboden.de/>, <https://www.ral-gg-fluessigboden.de/>) mit einer Qualitätssicherung der Produktion und der Produkte.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden hierzu beim Projektpartner IAB Weimar keine gesonderten Untersuchungen durchgeführt. Nahezu alle Böden eignen sich als Ausgangsmaterial und hier auch lehmige, tonige Materialien. Angesichts der quasi fehlenden Spezifikationen waren diese Untersuchungen auch nicht möglich bzw. notwendig.

Fazit

Die bei der Aufbereitung von Böden und Boden/Bauschutt-Gemischen anfallenden Massen und hier gerade auch die Schlämme lassen sich gut als Rohstoff für die Herstellung von Flüssigböden bzw. Bodenmörtel nutzen. Die Nassklassierung ist hierfür jedoch keine unabdingbare Voraussetzung. Der Rückgriff auf diese Schlämme ist wirtschaftlich nur dann sinnvoll, wenn sich keine anderen Verwertungsoptionen ergeben bzw. diese für Überschussmassen ergänzen. Derartige Ablagen dürften vor allem im städtischen Umfeld interessant sein mit der entsprechenden Nachfrage.

5. Die Optionen aus ökologischer Sicht

5.1 Bilanzrahmen und Daten

In der ökologischen Bewertung wird die aktuelle Verwertungssituation der Stoffströme Bodenbauschuttgemisch und Gleisschotter derjenigen nach einer Bodenwäsche gegenübergestellt. Der Systemrahmen ist in Abbildung 32 dargestellt. In die Bilanzierung fließen die Lasten für die Verwertung und der dadurch jeweils erzielte Nutzen ein.

Entsorgung im Status Quo

Beim Bodenbauschuttgemisch findet im Status Quo ohne Wäsche keine Aufbereitung beim Bauschuttrecycler statt. Das Material wird direkt deponiert oder in einfachen Verfüllmaßnahmen ohne Nutzen eingesetzt. Als Last kann hier die Deponierung angerechnet werden.

Für den Gleisschotter wird im Status Quo ohne Wäsche eine Verwertung im Straßen- und Wegebau unterstellt, wodurch von einer massegleichen Einsparung von natürlicher Gesteinskörnung und deren Herstellungslasten ausgegangen wird. Dafür muss der Gleisschotter zuvor trocken aufbereitet werden. Angelastet werden dafür der Dieselbedarf eines Radladers zur Aufgabe und Bewegung des Materials sowie der Strombedarf für die Klassierung.

Aufbereitung über die Nassklassierung

Für die Wäsche werden das Bodenbauschuttgemisch bzw. der Gleisschotter direkt auf die Anlage aufgegeben. Es wird unterstellt, dass danach der Stein- und Sandanteil massegleich den Einsatz von Gesteinskörnung / Zuschlag in der Betonindustrie substituieren kann, wohingegen der Schluffanteil Ton entweder in der Ziegelindustrie oder in der Erzeugung von Blähton einspart.

Für den Steinanteil des Gleisschotters wird der massegleiche Einsatz im Bereich der Edelsplitte angesetzt, für den Schluffanteil wiederum der auf Basis eines TS-Gehaltes von 96,5 % massegleiche Einsatz im Bereich Tonsubstitution wie oben benannt. Zusätzlich entsteht im Zuge der Wäsche des Bodenbauschuttgemisches im Gegensatz zum Gleisschotter Brechsand, für den massegleich eine Nutzung als Sandsubstitut in der Beton- oder Kalksandsteinindustrie angenommen wird. Die jeweils angesetzten Anteile an Gestein, Schluff und Brechsand am feuchten Output bzw. am trockenen Input sind in Tabelle 26: Bestandteile des feuchten Output- und des nassen Inputstoffstroms dargestellt.

Für den Schluff wurde bei den Versuchen jeweils der Anteil nassen Schluffes im Output der Wäsche ermittelt, welcher hier unter der Annahme, dass der TS-Gehalt im Input Schluff bei 96,5 % liegt, auf einen trockeneren Anteil im Input umgerechnet wird.

Die Einsparung von Produktionslasten durch Nutzung der Produkte vom Bauschutt-aufbereiter und der Wäsche wird über die in Tabelle 27: Prozessdaten, die durch die Produkte vom Bauschutt-aufbereiter und Wäsche eingespart werden (Nutzen) aufgeführten Prozessdaten abgebildet.

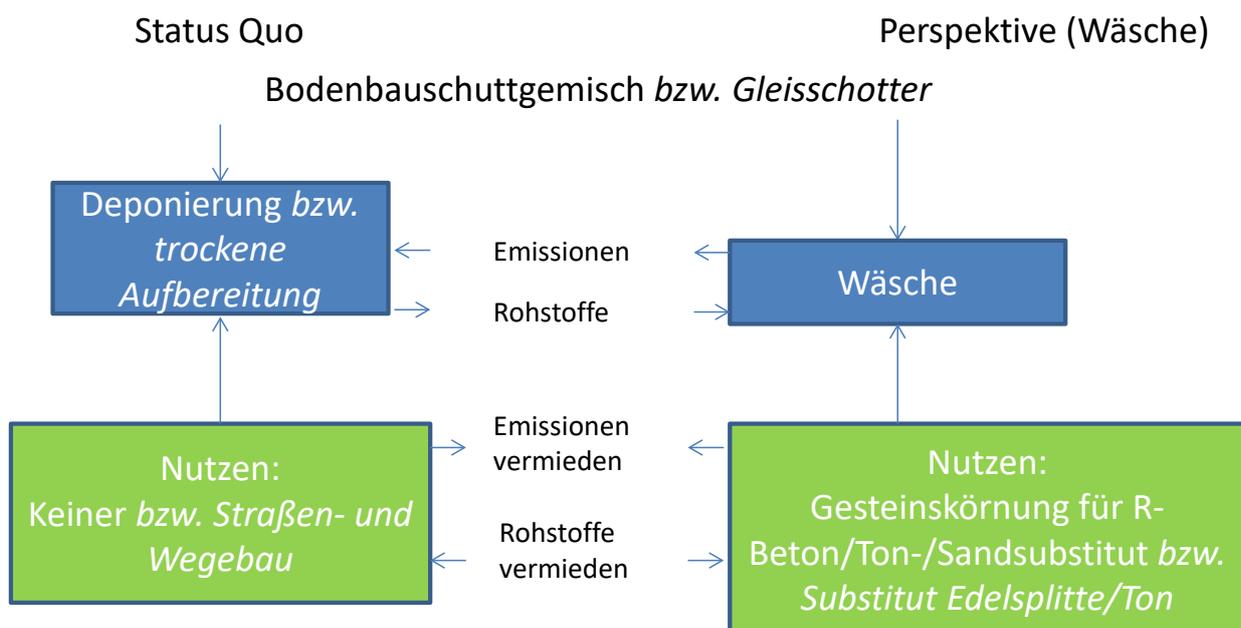


Abbildung 32: Bilanzrahmen für die ökologische Betrachtung der Wäsche und des Status Quo

DBU / AZ: 32046/01	Heinrich Feeß GmbH & Co. KG
---------------------------	-----------------------------

Tabelle 26: Bestandteile des feuchten Output- und des nassen Inputstoffstroms

Anteile am Stoffstrom	Bodenbauschuttgemisch 1,08 kg feuchter Output → 1 kg Input	Gleisschotter 1,03 kg feuchter Output → 1 kg Input
Schluff	19,1 % feucht am Output Wäsche (TS-Gehalt 60,1 %) → 12,8 % am Input (TS-Gehalt 96,5 %)	8,7 % feucht am Output Wäsche (TS-Gehalt 64,1 %) → 6,0 % am Input (TS-Gehalt 96,5 %)
Sand im Output → Sand + Brechsand aus Stein im Input	25 % trocken am Output → entsteht aus 26,9 % trocken am Input	0 % (kein Brechen Gleisschotter)
Stein → bleibt Stein im Output	55,9 % trocken am Output → 60,2 % trocken am Input	91,3 % trocken am Output → 94,0 % trocken am Input

Die Outputströme aus der Wäsche weisen eine höhere Feuchtigkeit auf als die durch sie substituierten Standardprodukte. Dies gilt insbesondere für den Schluff und ggf. auch für den Sand. Für die nachfolgende Nutzung wird das vernachlässigt. Für den Einsatz des Schluffes als Tonsubstitut in der Ziegel- und Blähtonproduktion wird auch nass gemahlen. Es wird davon ausgegangen, dass sich der Wassergehalt durch eine Umstellung der Entwässerungstechnik optimieren lässt. Ebenso wird in der Kalksandstein- und Betonindustrie Wasser zugegeben, so dass der Einsatz des feuchteren Brechsandes ebenso mit keiner zusätzlichen Prozessenergie verknüpft sein dürfte.

Dem Nutzen steht der Aufwand für die Wäsche entgegen. Benötigt werden Strom, Wasser und Flockungsmittel sowie ein Radlader im Dieselbetrieb zur Aufgabe des Materials in die Anlage. Strom wird durch den deutschen Strommix abgebildet, das Flockungsmittel wird als Polyacrylat angesetzt (jeweils eigene Daten). Es wird von einem abwasserfreien Betrieb ausgegangen.

Tabelle 27: Prozessdaten, die durch die Produkte vom Bauschuttzubereiter und Wäsche eingespart werden (Nutzen)

Abbildung Nutzen	Herangezogener Datensatz
Bodenbauschuttgemisch Wäsche Steinanteil: Ersatz Gesteinskörnung in Betonindustrie	Eigene erhobene Daten zum Kiesabbau
Gleisschotter und Bodenbauschuttgemisch Wäsche Schluffanteil: Tonersatz	Basierend auf Ecoinvent-Modul zum Tonabbau
Bodenbauschuttgemisch Wäsche Sandanteil (Brechsand): Sandersatz in Beton- und Kalksandsteinindustrie	Basierend auf Ecoinvent-Modul zum Sandabbau
Gleisschotter Status Quo: Straßen- und Wegebau	Basierend auf Ecoinvent-Modul zu gebrochenem Kalkstein
Gleisschotter Wäsche Steinanteil: Ersatz Edelsplitt	Basierend auf Ecoinvent-Modul zu zweifach gebrochenem Kalkstein

5.2 Bewertungsmethode

Zur Bewertung werden die einschlägigen Charakterisierungsfaktoren herangezogen (Tabelle 28: Betrachtete Wirkungskategorien). Da durch die Wäsche mineralische Ressourcen eingespart werden, ist als Summenindikator zusätzlich der kumulierte Rohstoffaufwand mit aufgenommen. In diesem werden nur die mineralischen, nicht-metallischen Materialmassen, die entnommen und

weiterverarbeitet werden, aufaddiert. Abraum wird nicht betrachtet, sondern nur die verwertete entnommene Menge. Es handelt sich dabei um eine Quantifizierung der Abbaumassen mineralischer Ressourcen, ohne eine Bewertung der jeweiligen Knappheit oder Verluste im Produktkreislauf vorzunehmen. Da in dieser Studie der Abbau mineralischer Ressourcen mit großem Vorkommen und großer Abbaumenge betrachtet wird, ist dieser Indikator zur hiesigen Bewertung geeignet.

Tabelle 28: Betrachtete Wirkungskategorien

Wirkungskategorie	Datenkategorie der Sachbilanz
Ressourcenbeanspruchung	<i>Summenindikator fossiler kumulierter Energieaufwand (MJ Heizwert):</i> Erdöl, Erdgas, Steinkohle, Braunkohle <i>Summenindikator mineralische Ressourcen: Steine, Splitt, Kies, Sand</i> <i>ADP elements</i>
Treibhauseffekt	fossiles Kohlendioxid (CO ₂), Methan (CH ₄), Lachgas (N ₂ O)
Versauerung	Schwefeldioxid (SO ₂), Stickstoffoxide, Ammoniak (NH ₃), Chlorwasserstoff (HCl), Fluorwasserstoff (HF), Schwefelwasserstoff (H ₂ S)
Eutrophierung	<i>terrestrisch:</i> Stickstoffoxide, Ammoniak <i>aquatisch:</i> N-Verbindungen, P-Verbindungen, CSB
Humantoxizität	<i>Krebsrisikopotenzial:</i> kanzerogene Schwermetalle und POP <i>Feinstaub (PM_{2,5}):</i> Primärpartikel, Sekundärpartikel aus SO ₂ , NO _x , NH ₃ , NM VOC

Um darüber hinaus Aussagen darüber treffen zu können, wie quantitativ bedeutend die Beiträge zu den jeweiligen Wirkungskategorien auch im Vergleich zueinander sind, werden die Ergebnisse anschließend auf die Wirkungen normiert, die ein Einwohner in Deutschland über die ganze Volkswirtschaft hinweg betrachtet jährlich verursacht. Die ökologische Bedeutung der jeweiligen Charakterisierungsfaktoren/Indikatoren wurde über das Umweltbundesamt in einer Ordinalskala qualitativ bewertet.

Tabelle 29: Jährliche Pro-Kopf-Lasten und ökologische Bedeutung für die Wirkungskategorien und Indikatoren

Wirkungskategorien/Indikatoren	Jährliche Pro-Kopf-Lasten	Ökologische Bedeutung
Treibhauseffekt	11.776 kg CO ₂ -äq./a	Sehr hoch
KEA fossil	134 GJ/a	Mittel
Versauerungspotenzial	31,5 kg SO ₂ -äq./a	Hoch
Terr. Eutrophierungspotenzial	5,03 kg PO ₄ -äq./a	Hoch
Aqu. Eutrophierungspotenzial	3,8 kg PO ₄ -äq./a	Mittel
Krebsrisikopotenzial	8,63 g As-äq./a	Sehr hoch
PM 2,5-Feinstaubpotenzial	23,9 kg PM 2,5-äq./a	Hoch
KRA mineralisch	7,5 Mg/a	

Quellen: Ökologische Bedeutung: UBA (1999)

Pro-Kopf-Lasten: UBA (2013), UBA (2014a), UBA (2014b), ABEB (2013), Destatis (2018) [32 – 37]

5.3 Ergebnisse

Wirkungskategorien und Indikatoren

Die Ergebnisse werden als sektorale Balkendiagramme für 1.000 t Materialinput dargestellt mit den Lasten, die nach oben abgetragen sind und den Entlastungen durch Einsparung von Primärmaterialien, die nach unten abgetragen sind. Daneben wird die Verrechnung von Lasten und Gutschriften als grauer Netto-Balken dargestellt und dies jeweils für die Systeme:

- Status Quo Bodenbauschuttgemisch ohne Wäsche (Status Quo Boden)
- Perspektive Bodenbauschuttgemisch mit Wäsche (Perspektive Boden).

In weiteren Diagrammen:

- Status Quo Gleisschotter ohne Wäsche (Status Quo Gleis)
- Perspektive Gleisschotter mit Wäsche (Perspektive Gleis)

Die Sektoren umfassen dabei die wesentlichen Prozessschritte und Vorketten, um die Hauptbeiträge erfassen zu können; auf Lastenseite sind dies:

- Trockene Schritte: bei Wäsche (Perspektive) Lasten für Betrieb Radlader zur Aufgabe des Inputmaterials in die Waschanlage; im Status Quo Lasten für Deponierung (Bodenbauschutt) bzw. einfache trockene Aufbereitung (Gleisschotter)
- Strom Wäsche: Lasten für die Bereitstellung des deutschen Strommixes, der in der Anlage verbraucht wird
- Polymer Wäsche: Bereitstellung des Flockungshilfsmittels, hier angesetzt als Polyacrylat

Auf Gutschriftenseite sind dies:

- Gutschrift (GS) Straßen- und Wegebau (Str. u Wegebau): Eingesparte Primärlasten für Nutzung Gleisschotter ohne Wäsche als Gesteinskörnungersatz
- GS Edelsplitt: Eingesparte Primärlasten für Produktion Edelsplitt
- GS Kies: Eingesparte Primärlasten für Kiesabbau (Betonproduktion)
- GS Sand: Eingesparte Primärlasten für Sandabbau
- GS Ton: Eingesparte Primärlasten für Tonabbau

Die Nassklassierung von Böden und Boden-/Bauschuttgemischen aus ökologischer Sicht

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse für die Behandlung des Bodenbauschuttgemisches dargestellt, beginnend mit dem Treibhauseffekt. Falls das Bodenbauschuttgemisch im Status Quo (SQ Boden) deponiert wird, fallen Lasten für die Einlagerung und den Betrieb der Deponie an. Der hierfür angesetzte Strombedarf entspricht demjenigen einer Asche- und Schlackedeponie und ist damit recht hoch angesetzt, so dass er im Treibhauseffekt ca. 33 % der dargestellten Lasten verursacht (Abbildung 33). Es handelt sich um die „worst case“-Betrachtung des Status Quo. Wenn statt einer Deponierung eine Verwendung in einfachen Verfüllmaßnahmen erfolgt, sind damit weder Lasten noch Nutzen verbunden, weil keine zusätzliche Aufbereitung stattfindet und ansonsten andere Materialien eingebaut werden würden; die Last sinkt dann auf 0 ab. In der Praxis werden die Ergebnisse irgendwo in diesem Bereich liegen, so dass die Lasten für die Deponierung schraffiert dargestellt sind. Der Strombedarf für die Wäsche des Bodenbauschuttgemisches (Perspektive Boden) verursacht im Treibhauseffekt die größte Last, die durch den mit der Wäsche erzielbaren Nutzen nicht ganz ausgeglichen werden kann, so dass eine Netto-Last verbleibt. Den größten Nutzen bringt der mengenmäßig dominante Teil des Gesteins, der im R-Beton Primärkies substituiert, gefolgt von der nächst größeren (Brech)Sandmenge und dem Schluffanteil, der Ton substituiert.

Unter den Nettobalken ist angegeben, wie weit die betrachteten 1.000 t Material als trockener Output mit dem LKW in km Strecke transportiert werden müssten, um die resultierenden Nettolasten (positive Streckenangaben) oder –einsparungen (negative Streckenangaben) zu erreichen. Damit zeigt sich, dass die Nettolasten für die Wäsche des Bodenbauschuttgemisches einer LKW-Transportstrecke von 12 km entsprechen. Wenn die Produkte aus der Bodenwäsche entsprechend 12 km näher am Absatzort liegen als die Primärmaterialien aus weiter entfernten Kies-, Sand- und Tongruben, kehrt sich die Nettolast ohne Transportbetrachtung in eine Nettoentlastung um. Wenn das Bodenbauschuttgemisch im Status Quo deponiert werden muss, ist die Netto-Last der Bodenwäsche ggf. von vornherein kleiner als der Deponierungsaufwand und damit vorteilhaft. Der verhältnismäßig große Beitrag der Deponierung zeigt, dass sich die Lasten für das System der Bodenwäsche auf niedrigem Niveau bewegen.

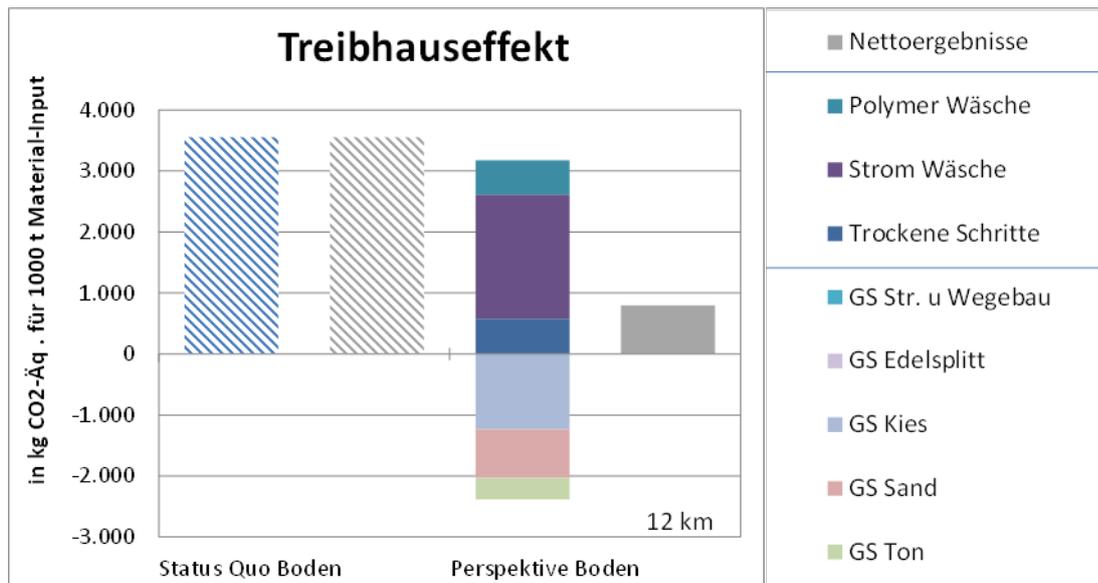


Abbildung 33: Treibhauseffekt für die Behandlung des Bodenbauschuttgemisches

Die Ergebnisse für den fossilen kumulierten Energieaufwand ähneln denen des Treibhauseffekts, weil dieser in den betrachteten Systemen v.a. durch die Verbrennung fossiler Energierohstoffe für die Erzeugung von Strom und den Antrieb von Radladern verursacht wird.

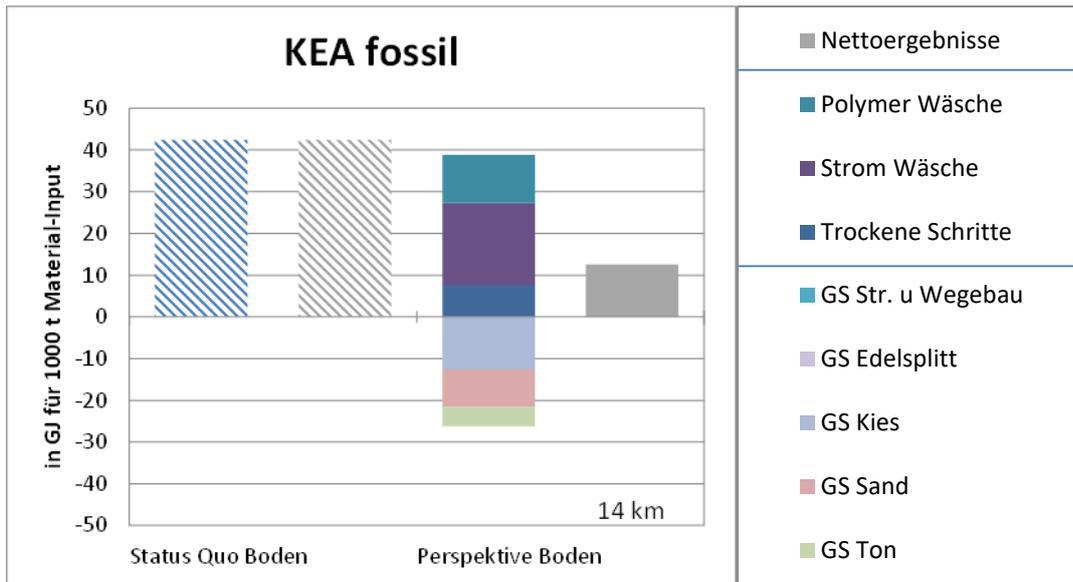


Abbildung 34: fossiler kumulierter Energieaufwand (KEA fossil) für die Behandlung des Bodenbauschuttgemisches

Auch die Muster im Terrestrischen Eutrophierungspotenzial, Versauerungspotenzial und Feinstaubpotenzial ähneln dem Treibhauseffekt sehr. Bei letzteren beiden steigt die Netto-Last der Wäsche sowohl hinsichtlich der LKW-Transportstrecke der Materialien, welche dieselben Lasten verursachen würde, als auch im Vergleich zur Deponierung des Materials etwas an.

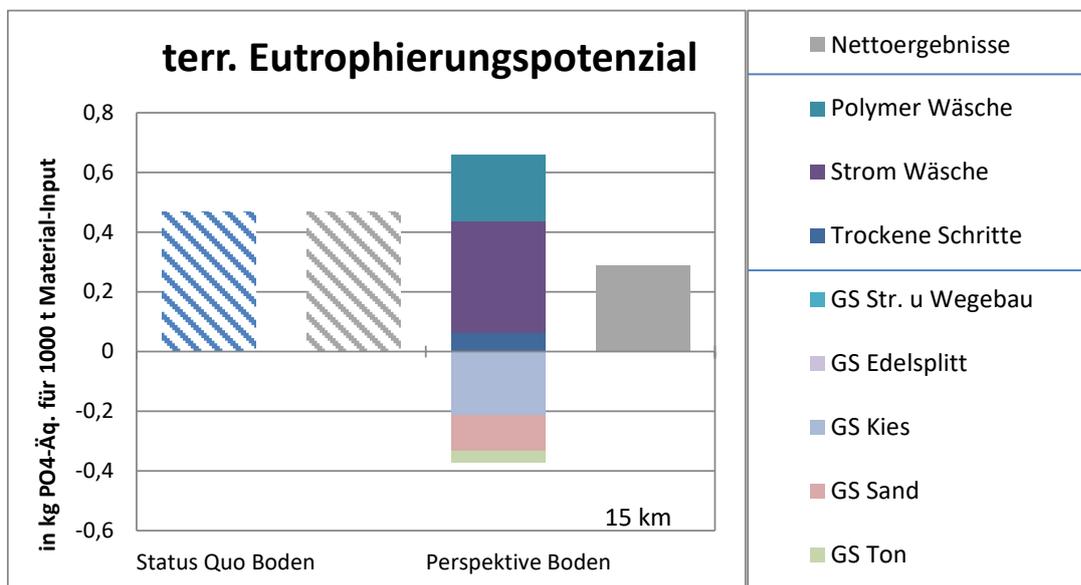


Abbildung 35: Terrestrisches Eutrophierungspotenzial für die Behandlung des Bodenbauschuttgemisches

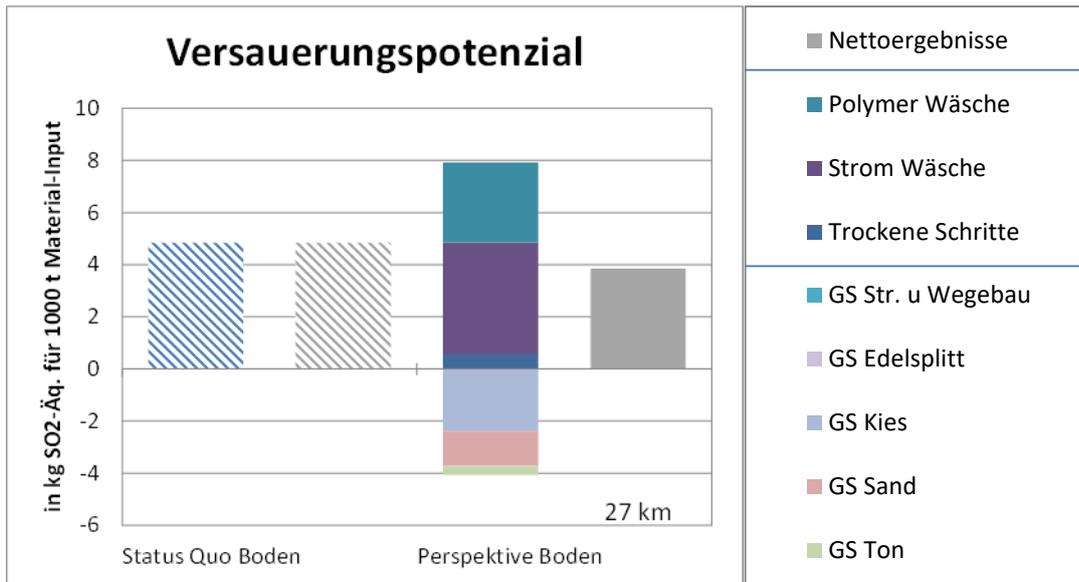


Abbildung 36: Versauerungspotenzial für die Behandlung des Bodenbauschuttgemisches

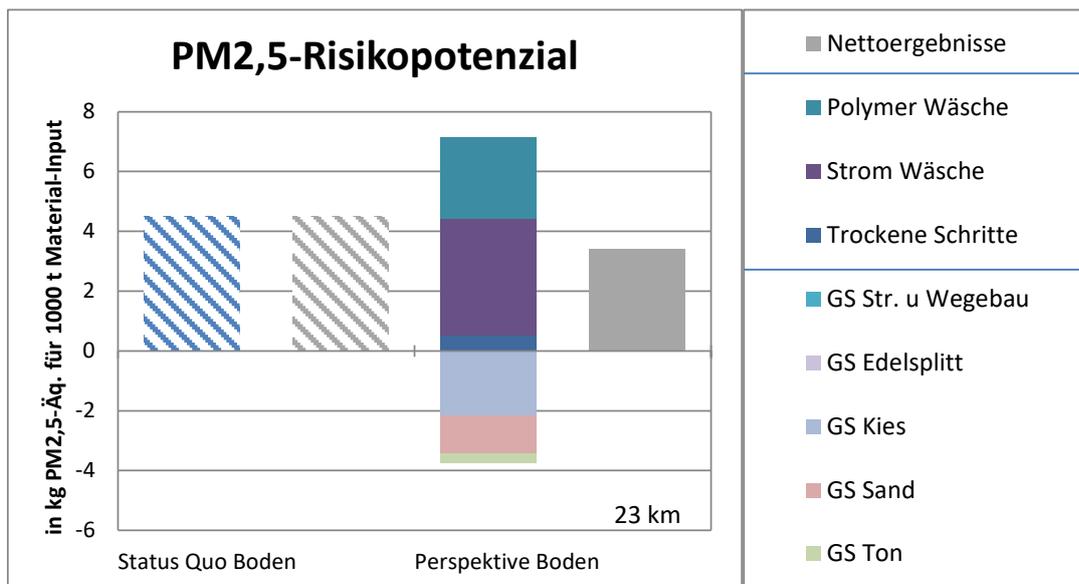


Abbildung 37: Feinstaubpotenzial (PM 2,5) für die Behandlung des Bodenbauschuttgemisches

Beim Krebsrisikopotenzial kann über die Wäsche eine Netto-Entlastung erzielt werden. Die Bedeutung des Lastbeitrags durch die Aufgabe auf die Anlage über den Radlader ist genauso groß wie diejenige durch die Strombereitstellung.

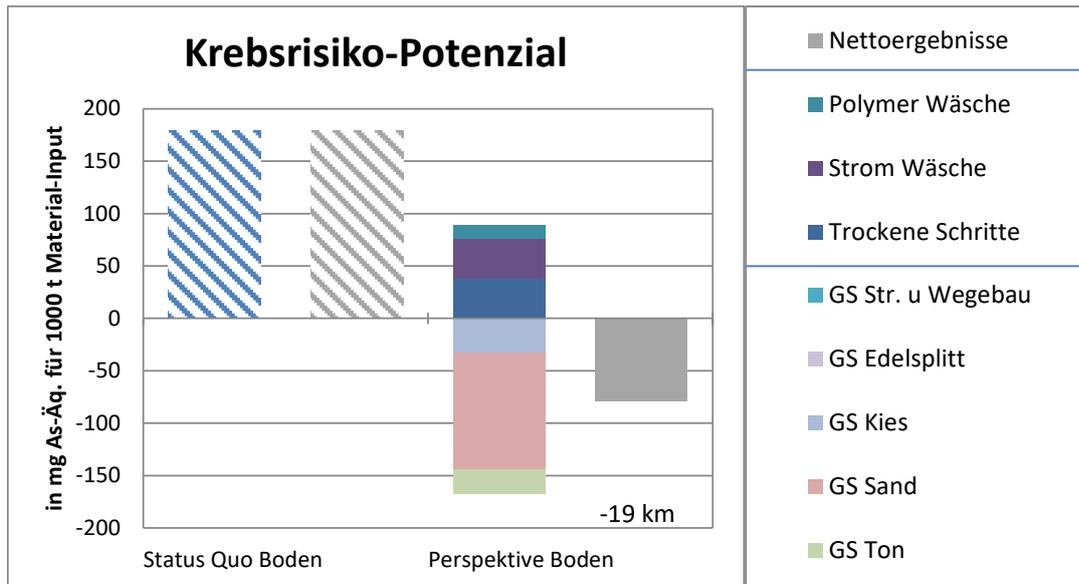


Abbildung 38: Krebsrisikopotenzial für die Behandlung des Bodenbauschuttgemisches

Durch die Bodenwäsche lassen sich Produkte erzeugen, die primäre Materialien substituieren können, was sich im kumulierten Rohstoffaufwand (KRA mineralisch) in einer deutlichen Einsparung niederschlägt.

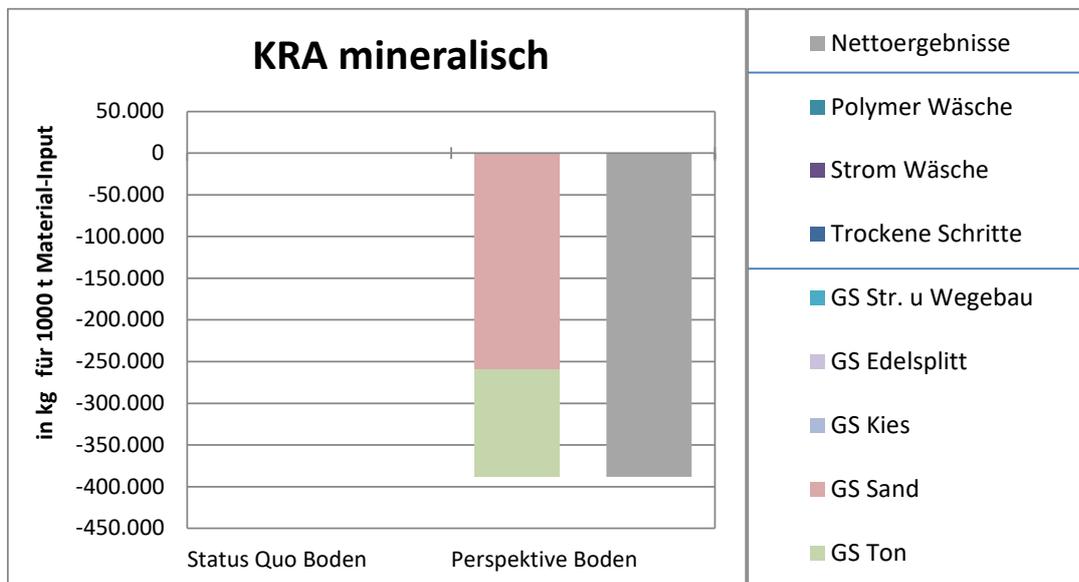


Abbildung 39: Kumulierter mineralischer Rohstoffaufwand (KRA mineralisch) für die Behandlung des Bodenbauschuttgemisches

Die Nassklassierung von Gleisschotter aus ökologischer Sicht

Beim Gleisschotter wird auch ohne Wäsche ein Nutzen über den Einsatz im Bereich Straßen- und Wegebau erzielt, der durch die Wäsche und den dadurch ermöglichten Einsatz im Bereich Edelsplitt etwas vergrößert wird (Abbildung 40). Der Nutzen wird auch mit Wäsche fast ausschließlich über den Gesteinsanteil erzielt, weil der Schluffanteil demgegenüber gering ausfällt und kein (Brech)Sand anfällt. Dem stehen aber die Lasten der Wäsche gegenüber, die auch hier v.a. durch den Strombedarf verursacht werden, aber kleiner ausfallen als beim Bodenbauschutt, so dass eine Netto-Einsparung

erzielt wird. Diese ist aber kleiner als die Netto-Einsparung ohne Wäsche. Ebenso deutlich sichtbar sind die Lasten für die trockene Aufbereitung des Gleisschotter im Status Quo durch Energiebereitstellung für Radler und Stromverbrauch durch Klassierung, wengleich sie kleiner ausfallen als diejenigen für die Wäsche. Die deutliche Sichtbarkeit dieser relativ geringen Lasten im System zeigt, dass die Bodenwäsche relativ niedrige Lasten bedingt.

Die Nettoentlastungen für Gleisschotter ohne und mit Wäsche entsprechen einer LKW-Transportstrecke der Materialien von -23 km versus -6 km. Die geringere Nettoentlastung mit Wäsche gegenüber dem Status Quo ohne Wäsche kehrt sich zum einen dann um, wenn entweder der substituierte Edelsplitt um entsprechend 17 km weiter angefahren werden müsste als das substituierte Primärgestein für den Straßen- und Wegebau. Zum anderen sind die Aufnahmekapazitäten im Straßen- und Wegebau beschränkt, wenn zukünftig weniger Material in einfache Verfüllungen gelangen soll. Da der Gleisschotter zusätzlich von außen in das System Straßen- und Wegebau gelangt, kann es sein, dass für diesen dann dort keine Aufnahmekapazität mehr vorhanden ist, so dass er dann nichts substituieren könnte. Dann wäre die kleinere Netto-Entlastung durch die Wäsche vorteilhaft gegenüber gar keiner Entlastung.

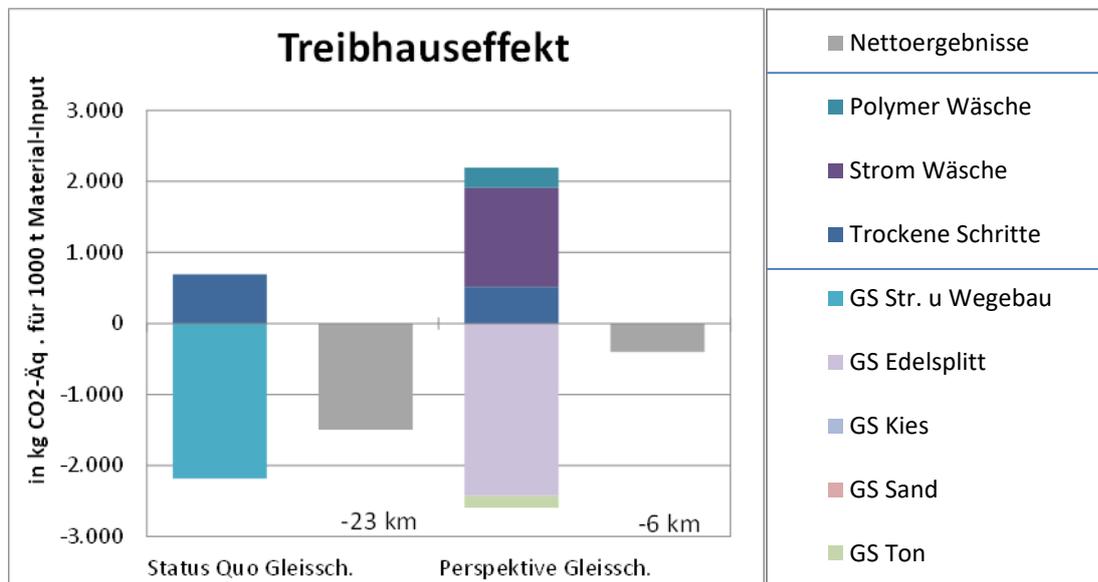


Abbildung 40: Treibhauseffekt für die Behandlung des Gleisschotter

Das Muster im fossilen kumulierten Energieaufwand (KEA fossil) ist wiederum dem des Treibhauseffekts ähnlich, weil auch hier der Treibhauseffekt durch die Verbrennung fossiler Energierohstoffe verursacht wird.

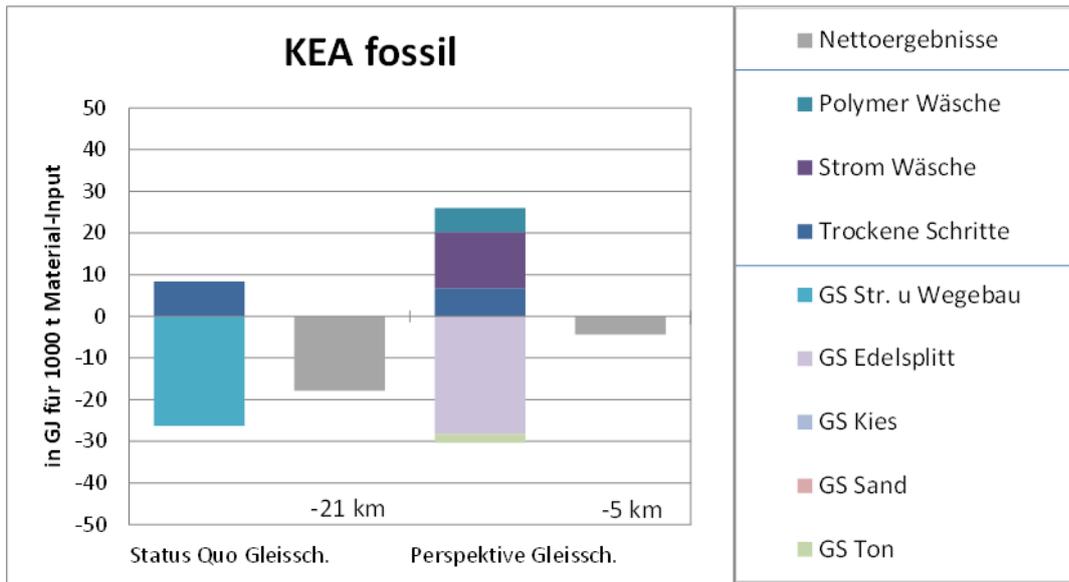


Abbildung 41: Fossiler kumulierter Energieaufwand für die Behandlung des Gleisschotters

Im terrestrischen Eutrophierungspotenzial, Versauerungspotenzial, Feinstaubpotenzial und Krebsrisikopotenzial überwiegen deutlich die Einsparungen, die auf die Substitution von Gestein und insbesondere die dadurch eingesparte Sprengung mit ihren Emissionen zurückgehen.

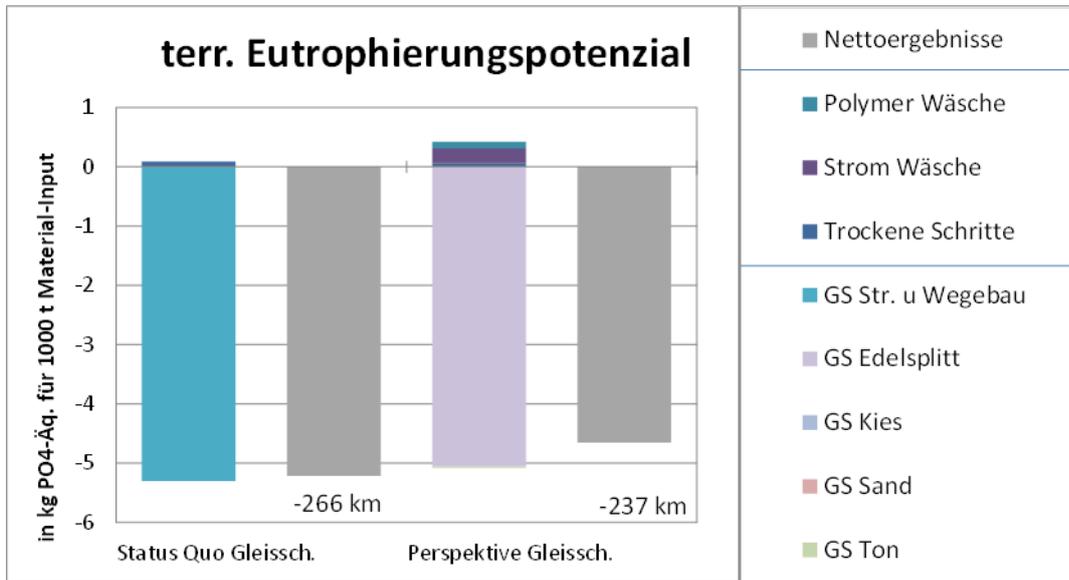


Abbildung 42: Terrestrisches Eutrophierungspotenzial für die Behandlung des Gleisschotters

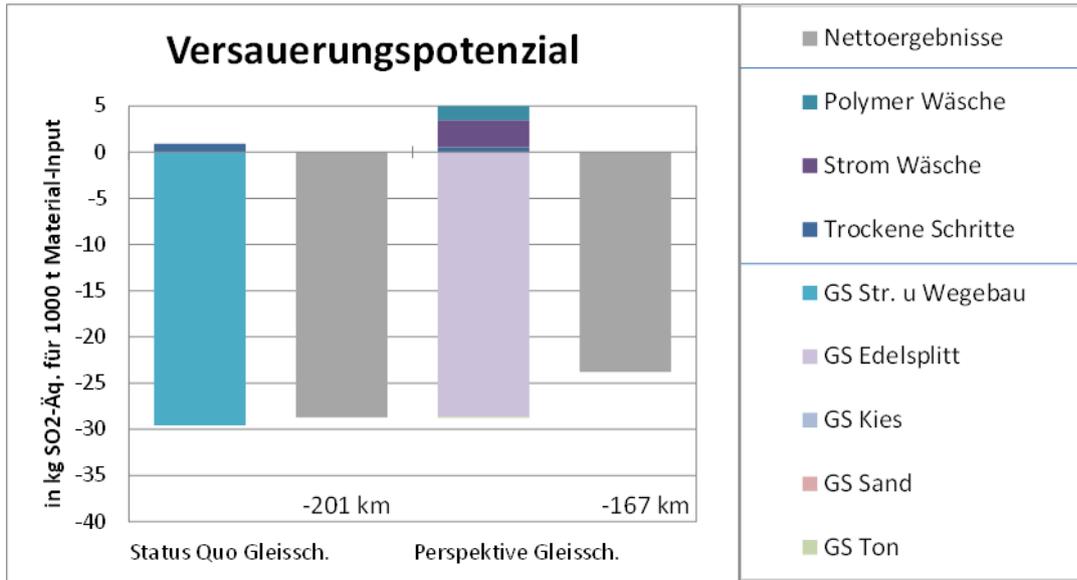


Abbildung 43: Versauerungspotenzial für die Behandlung des Gleisschotters

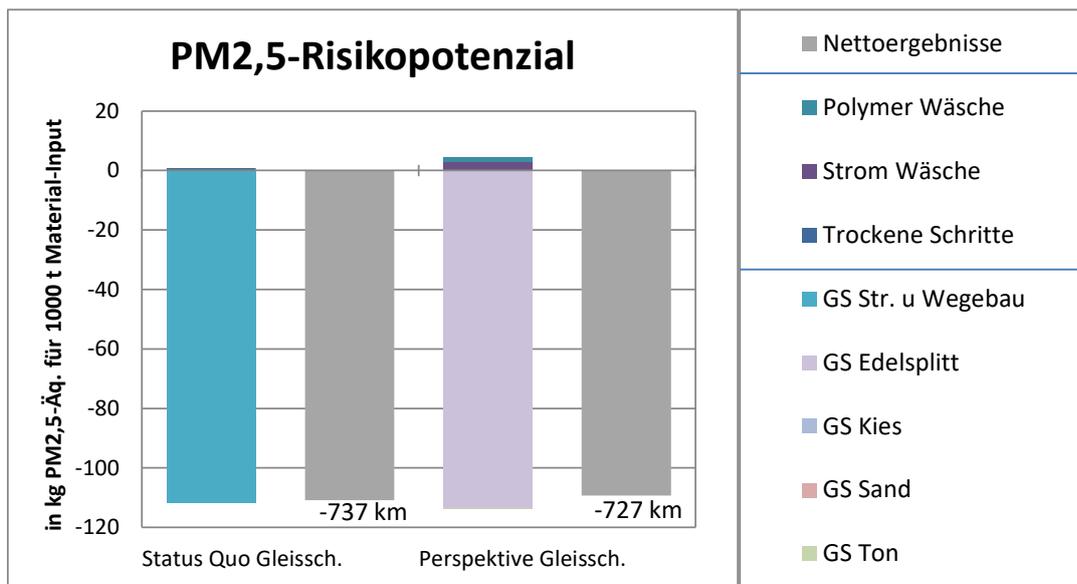


Abbildung 44: Feinstaubpotenzial (PM 2,5) für die Behandlung des Gleisschotters

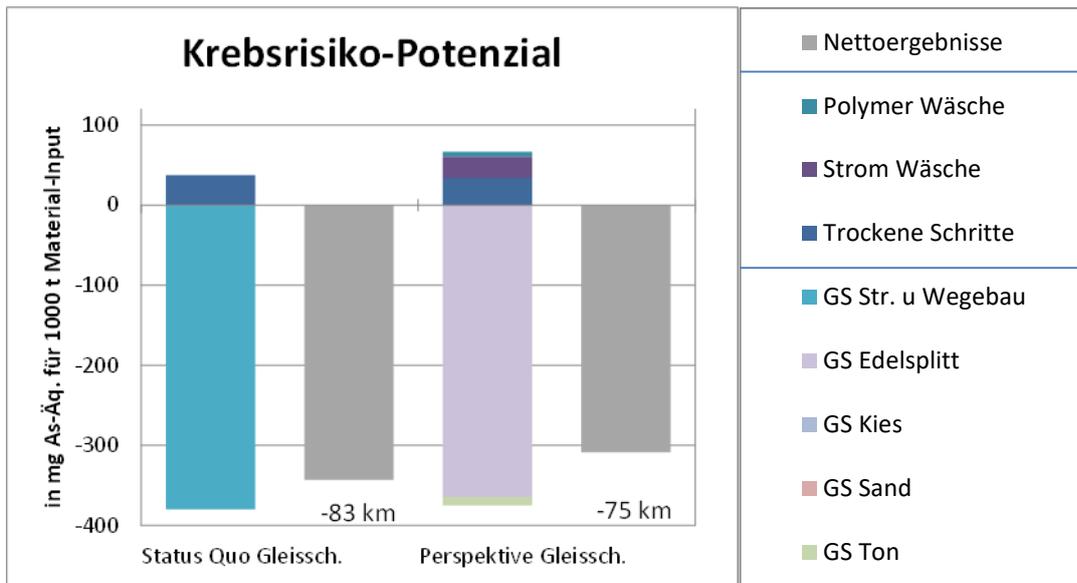


Abbildung 45: Krebsrisikopotenzial für die Behandlung des Gleisschotters

Im kumulierten mineralischen Rohstoffaufwand unterscheidet sich der Status Quo nicht von der Wäsche, weil in beiden Fällen primäre mineralische Rohstoffe in gleicher Menge eingespart werden. Die zugehörigen Charakterisierungsfaktoren zwischen Stein für den Straßen- und Wegebau auf der einen Seite und Edelsplitt sowie Ton auf der anderen Seite sind nahezu identisch.

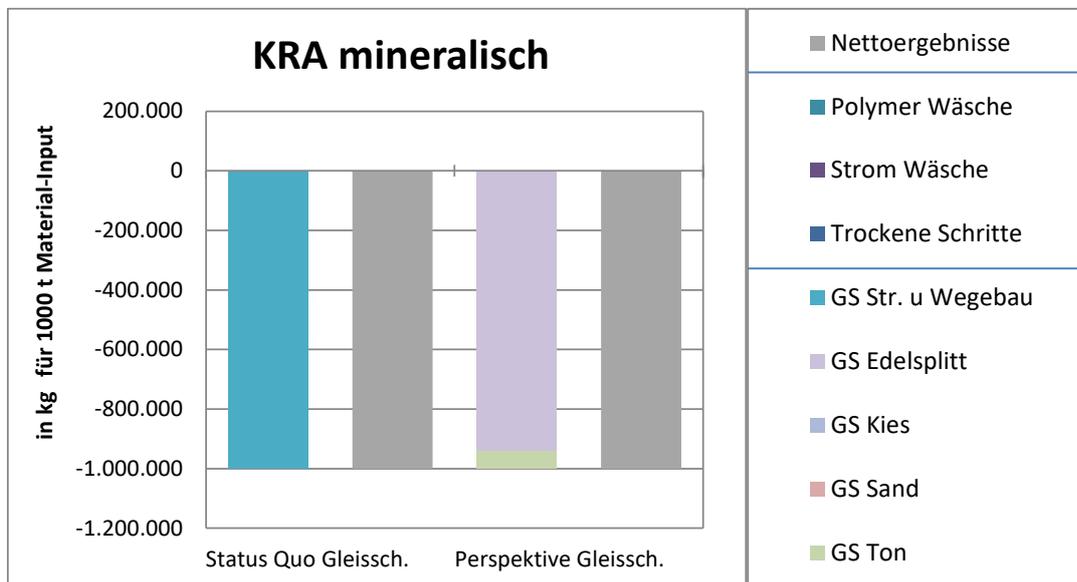


Abbildung 46: Kumulierter mineralischer Rohstoffaufwand (KRA mineralisch) für die Behandlung des Gleisschotters

Normierung und Interpretation

Im Folgenden sind die eben betrachteten Nettowerte nach Skalierung von 1.000 t auf 125,2 Mio. t auf die jeweiligen pro-Kopf-Lasten in Deutschland normiert in Einwohnerdurchschnittswerten (EDW) dargestellt, links jeweils in jeder Wirkungskategorie für das System Bodenbauschuttgemisch Status Quo und Wäsche (Perspektive) und rechts dasselbe für Gleisschotter (Gleichsch.). Die Lasten für die

Deponierung im Status Quo für Bodenbauschuttgemisch sind wieder als die maximalen Werte gestrichelt dargestellt. Im Jahr 2016 wurden 125,2 Mio. t Abfallmassen Boden- und Steine statistisch erfasst [4]. Dies entspricht demnach der Abfallmenge von 80 Mio. EDW.

Es zeigt sich zum einen, dass die Netto-Ergebnisse des kumulierten Rohstoffaufwandes (KRA mineralisch) mit Einsparungen von >1 Mio. EDW die mit Abstand quantitativ größte Bedeutung haben. Die Bedeutung aller anderen Indikatoren ist demgegenüber gering. Zum anderen sind die Netto-Lasten, die mit der Wäsche des Bodenbauschuttgemisches verursacht werden, quantitativ irrelevant.

Mit geringen Lasten kann dementsprechend eine sehr bedeutende Menge an mineralischen Rohstoffen eingespart werden. Auch wenn die qualitative ökologische Bedeutung der Einsparung der mineralischen Rohstoffe aufgrund der breiten Verfügbarkeit nicht mit der sehr hohen Bedeutung bspw. des Treibhauseffekts vergleichbar ist, so ist dies aufgrund der großen Menge doch bedeutsam und ein relevanter Beitrag zum Ressourcenschutz.

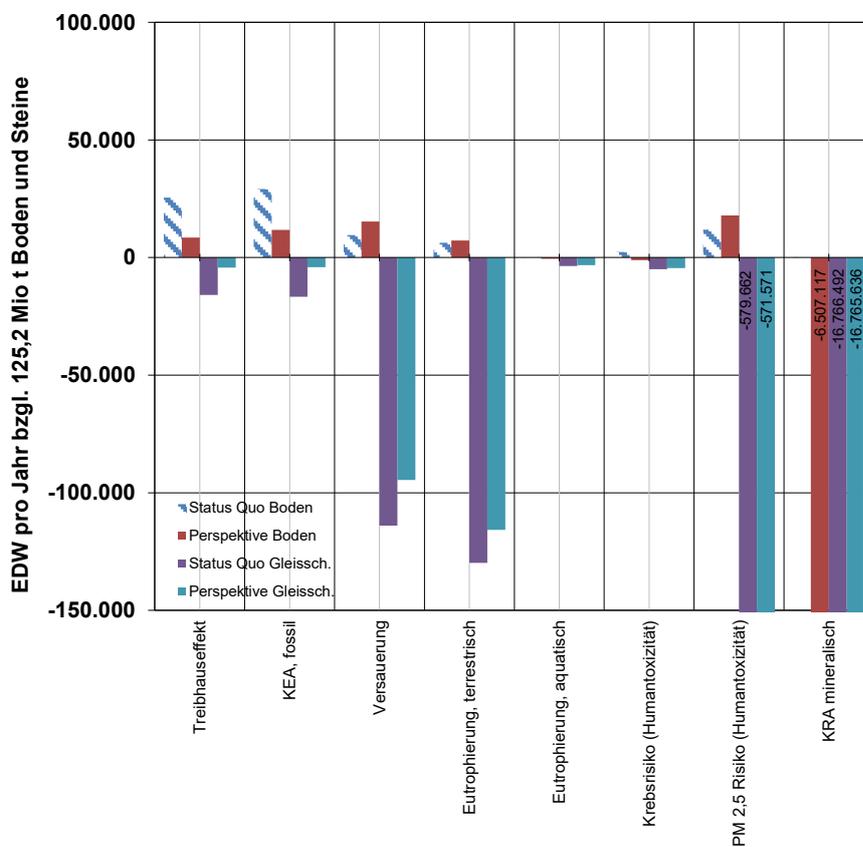


Abbildung 47: Nettowerte nach Skalierung von 1.000 t auf 125,2 Mio. t auf die jeweiligen pro-Kopf-Lasten in Deutschland normiert in Einwohnerdurchschnittswerten (EDW)

6. Schlussfolgerungen

6.1 Verwertung von Gleisschotter

Die nasse Aufbereitung von Gleisschottermaterial ist eine sinnvolle Alternative zur herkömmlichen Entsorgung. Diese Form der Aufbereitung ist daher auch schon durchaus üblich und an mehreren Standorten praktiziert.

Das Gleisbettmaterial wird vor allem vor Ort im Netz durch mobile Anlagen aufbereitet und direkt wieder eingebaut. Zu externen Aufbereitern gelangen die Massen aus anderen Baustellen, die keine unmittelbare Rückführung erfordern. Dies können bspw. Massen sein, die bei der Konversion und Erschließung alter Güterbahnhofsgebiete zur Entsorgung anfallen. Während es sich im oberen Bereich eines Gleisbettes um reines Schottermaterial handelt, das sich gut vor Ort aufbereiten und wieder rückführen lässt, erhöht sich sukzessive der Bodenanteil in den tieferen Schichten. Diese Gemische machen eine externe Aufbereitung erforderlich.

Diese externe Aufbereitung besteht aus einer Kombination aus Brecher und Nassklassierung. Der Brechvorgang erfolgt dabei schonend. Ziel ist es nicht, die Korngröße des Materials zu verringern. Das Brechen schärft die Bruchkanten und führt dazu, dass der Schotter sich – eingebaut in das Gleisbett – gut verzahnt und somit gut auf die mechanische Beanspruchung aus der Trassennutzung reagieren kann. Die geforderte Korngröße liegt zwischen 31,5mm und 63mm, kleinere Steine würden vom Luftzug der fahrenden Züge mitgerissen werden.

Bei Gleisschotter handelt es sich um sehr widerstandsfähiges Material. Entsprechend gut eignen sich die aufbereiteten Materialien auch für andere Einsatzbereiche. Klassisch ist die Vermarktung der Körnungen <32mm in die Asphaltproduktion. Ebenso möglich ist auch die Vermarktung in den Transportbeton, hier allerdings mit einer Begrenzung des Größtkorns auf 16mm oder 22mm. Durch die Wäsche wird auch der höchstzulässige Gehalt abschlämmbarer Anteile sicher eingehalten. Sowohl die Asphaltrezepturen als auch die Betonrezepturen benötigen auch Sande, so dass für nahezu das ganze Kornspektrum Absatzweg in diesen Bereichen gefunden werden können.

Ein Massenstrom sind die Feinanteile, die als Schluff/Ton aus der Aufbereitung des Waschwassers zu Entsorgung anfallen. In diesem Massenstrom reichern sich auch Schadstoffe an, die an den Gesteinskörnungen anhaftend durch die Wäsche abgewaschen werden. Das Material muss daher auf Deponien entsorgt werden, möglicherweise aber unter Nutzung der wertgebenden Eigenschaften und damit als Deponiebaustoff.

In der ökologischen Bewertung mittels Ökobilanz schlägt sich dieser mit der Aufbereitung verbundene Erfolg nicht nieder. Hier werden in allen Fällen Sande, Kiese oder gebrochener Naturstein substituiert. Eine Ausdifferenzierung von Gesteinsqualitäten ist nicht möglich. Damit entfallen der Nutzen, der sich daraus für das jeweilige Produkt ergeben und sich prinzipiell auch aus Umweltsicht niederschlägt: Höhere Widerstandsfähigkeit und damit Langlebigkeit. Das Aufbereiten und Rückführen der Materialien haben außerdem eine Entlastung der Transportketten zur Folge. Werden derart hochwertige Materialien ersetzt umso mehr, da es nur wenige Abbaustätten gibt.

Die Aufbereitung von Gleisschottermaterial ist wirtschaftlich interessant. Für diese Verwertungswege müssen daher keine gesonderten Anstrengungen zur Überwindung von Hemmnissen unternommen werden. Auch ergibt sich kein weiterer Forschungsbedarf. Die Aufbereitung und hochwertige Verwertung von Gleisschottermaterial ist Stand der Technik und gut geübte Praxis.

6.2 Verwertung von Böden und Boden-Bauschuttgemischen

Jährlich fallen in Deutschland etwa 150 Mio. Tonnen Böden zur Entsorgung an. Es handelt sich hier vor allem um den klassischen Bodenaushub, wie er bei Baumaßnahmen zur Entsorgung anfällt. Da sich die Baumaßnahmen immer mehr auf den Bestand an Siedlungsflächen konzentrieren, sind diese Böden nicht selten anthropogen überformt. Sie weisen aus der Siedlungsgeschichte eine gewisse Schadstoffbelastung auf, nicht selten finden sich auch Bauschuttanteile darin. Viele Böden dürften zudem nicht über die Abfallstatistiken erfasst sein, d.h. das Aufkommen in der Praxis liegt eher noch höher.

Böden stellen ein zunehmendes Entsorgungsproblem dar. Deponie-Kapazitäten oder auch Möglichkeiten über Verfüllbetriebe stehen immer weniger zur Verfügung, letztere auch zunehmend nur noch für unbelastetes Material. Die Entsorgungspreise sind über die letzten Jahre daher auch merklich gestiegen. Diese steigenden Entsorgungspreise schaffen aber auch Spielräume, indem Aufbereitungstechniken und –prozesse wettbewerbsfähig werden und damit auch innovative Ansätze, wie im Forschungsprojekt untersucht und diskutiert.

Damit werden diese Abfallmassen zum ersten Mal in einen Wirtschaftskreislauf zurückgeführt. Die Verwertung erfolgt mit einigem Aufwand. Aufwand und Nutzen stehen aber in einem guten Verhältnis, wie auch aus den Ergebnissen der Ökobilanz ersichtlich wird.

Die Untersuchungen der Möglichkeiten der Aufbereitung dieser Abfallmassen erfolgten am konkreten Beispiel der Aufbereitungsanlage in Kirchheim/Teck auf dem Standort der Fa. Feeß. Eine wichtige Erkenntnis aus diesen Untersuchungen war, dass sich Böden und Boden-Bauschuttgemische über diesen Aufbereitungsansatz durchaus verwerten lassen. Die Aufbereitung ist technisch möglich, für die Massenströme lassen sich Absatzwege erkennen. Für den Standort erfolgsversprechend waren insbesondere

- Verwendung der Schlämme bzw. der Schluff-/Tonfraktion als Rohstoffe für den Lehm- (bei Verwendung eines anorganischen Fällmittels), wobei die Überschussmassen auch zu Flüssigboden verarbeitet werden können.
- Verwendung der Sande in der Produktion von Transportbeton oder Betonwaren, wobei die Trennung zwischen den Fraktionen Sand und Schluff optimiert werden muss.
- Die größeren Gesteinskörnungen lassen sich über mehrere Wege verwerten und dies in den üblichen Wegen des Erdbaus (Bettungsmaterial, Wegeplatten und ähnliche Einsatzmöglichkeiten im Garten- und Landschaftsbau), aber auch als Zuschlag bei der Produktion von Transportbeton.

Grundsätzlich erlaubt die Nassaufbereitung und –klassierung die Produktion hochwertiger Rohstoffe für die Baustoffindustrie. Die derzeit gegebenen Rahmenbedingungen stehen dem aber noch entgegen.

Ein ganz entscheidender Faktor sind die geogenen Rahmenbedingungen, die eine Verwertung der Sande in Richtung Kalksandstein- oder auch der Schluffe in Richtung Ziegelindustrie verhindern und sich auch nicht über eine optimierte Aufbereitungstechnik auffangen lassen. Im Umkehrschluss bedeutet dies aber, dass sich für diese Aufbereitungstechnik und die erzeugten Stoffströme in anderen natürlichen Standortvoraussetzungen günstige Absatzsituationen vorstellen lassen.

Weitere Hemmnisse ergeben sich aus der Anlagentechnik. Dies sind vor allem Defizite in der Schlammentwässerung, die bspw. über den Ersatz des Zyklons durch eine Kammerfilterpresse aufgefangen werden könnten, und in der mangelnden Trennschärfe zwischen den Fraktionen Sand und Schluff. Abschlämbare Anteile mindern die Qualität des Sandes, sandige Anteile die des Schluffes.

Böden lassen sich vor allem dann nur schlecht trocken aufbereiten, wenn sie große Anteile bindiges Material beinhalten und damit eine klassische Siebung erschweren. Wie die Praxis zeigt, kommt aber auch eine Nassklassierung hier an ihre Grenzen. Das Inputmaterial muss einen Mindestanteil an Körnung aufweisen. Der Anteil bindiges Material im Input begrenzt die Durchsatzleistung der Anlage. Ideal sind eher sandige oder gar kiesige Böden in der Aufbereitung.

Grundsätzlich sind die Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt durchaus ermutigend. Mit einer optimierten Aufbereitungstechnik und anderen geogenen Standortbedingungen verspricht dieser Ansatz der Verwertung des großen Abfallmassenstroms Boden und Steine durchaus Lösungen. Um die erforderliche Rohstoffeffizienz zu erreichen, müssen Böden als Rohstoffe verstanden und entsprechend aufbereitet in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt werden.

Hierauf gilt es aufzubauen und zwar im intensiven Austausch mit der Baustoffindustrie. Die Aufbereitungstechnik und die Eigenschaften der Massen im Anlagenoutput müssen weiter auf die Erfordernisse und deren Rohstoffspezifikationen angepasst werden. Dies sollte vor einem geeigneten geologischen Hintergrund erfolgen und sich vor allem auf die Weiterentwicklung der Anlagentechnik sowie ein dazu passendes Stoffstrommanagement konzentrieren. Die Outputmassen müssen als Rohstoffe geeignet sein und in ihren Eigenschaften möglichst nahe an die der konventionellen Rohstoffe herankommen. Möglicherweise ergeben sich aber dadurch Toleranzbereiche, dass diese in der Praxis wahrscheinlich nur einen Teilstrom der Rohstoffversorgung von Produktionsanlagen darstellen können und zugemischt werden müssen. Trotz Optimierung der Anlagentechnik wird immer die Auswahl geeigneten Ausgangsmaterials, ergänzt um gezielte Mischungen notwendig werden. Abfallmassen werden nie so homogen und auf die Spezifikationen zugeschnitten vorliegen, wie gewünscht. Die Anfallstellen der Abfallmassen wären ansonsten für die Ausbeutung geeignete Rohstofflagerstätten.

7. Zusammenfassung und Ausblick

In der Bodenaufbereitungsanlage der Firma FEES werden Gleisschotter und Boden-Bauschutt-Gemische aufbereitet. Ziel ist die Erzeugung von vermarktbareren Produkten. Dieses Ziel kann für die Splitte und Sande nahezu erreicht werden. Sie eignen sich von den physikalischen und stofflichen Eigenschaften sowie wegen ihres großen Anteils an natürlichen Gesteinskörnungen für die Betonherstellung. Verbesserungen hinsichtlich einer Vergleichmäßigung der Eigenschaften sind durch eine Homogenisierung des Ausgangsmaterials oder der Produkte realisierbar. Mit dieser technologischen Maßnahme ließe sich auch ein einheitlicheres Erscheinungsbild dieser Produkte erreichen.

Die hervorstechenden Eigenschaften der Schluffe sind der hohe Wassergehalt, die hohe Feinheit und die vergleichsweise geringen Schwankungsbreiten der Eigenschaften. Der Einsatz als Magerungs- und/oder Porosierungsmittel für wärmedämmende Hochlochziegel in der Ziegelindustrie wäre denkbar. Dazu sind Untersuchungen mit der Grundmasse des in Frage kommenden Ziegelherstellers durchzuführen.

Die Herstellung von Flüssigböden stellt eine weitere Verwertungsoption dar. Dafür eignen sich sowohl die Sande als auch die Schluffe.

Als weiterer Verwertungsweg für den Schluff kommt die Herstellung von Aufbaukörnungen, d. h. thermisch verfestigten Granulaten aus Mauerwerkbruch, die in ihren Eigenschaften mit Blättonen vergleichbar sind, in Frage. Infolge des hohen Feuchtegehalts des Materials kommt aus energetischen Gründen aber nur eine gemeinsame Verarbeitung mit einer zweiten - möglichst trockenen Komponente - in Frage.

Um die vorgeschlagenen Verwertungswege zu realisieren, werden weitere Untersuchungen vorgeschlagen:

- Untersuchungen zur Anwendung der Schluffe und ggf. der Sande für die Herstellung von porosierten Hochlochziegeln
- Dafür müssen mit der am ausgewählten Standort verwendeten Rohstoffmasse zunächst Versatzuntersuchungen gemacht werden, um die Auswirkungen in Abhängigkeit von der Versatzmenge zu testen. Aufbauend auf den Ergebnissen können die Zugabemenge und ggf. weitere technologische Parameter in einem Werksversuch getestet werden.
- Optimierung der Herstellung von Leichtgranulaten unter Verwendung von unternehmenseigenen Reststoffen
- Es müssen Untersuchungen zur Granulatherstellung mit den nachträglich angelieferten Reststoffen durchgeführt werden. Im Vordergrund steht dabei die Verarbeitung des Ausgangsmaterials ohne vorherige Trocknung zu stabilen Grüngranulaten.
- Optimierung des verfahrenstechnischen Ablaufs der Herstellung der Flüssig-böden - um den Wassergehalt des Schluffs zu nutzen. Auch die gemeinsame Verarbeitung von Sand und Schluff kann hier Vorteile bringen.
- Entwicklung von Betonrezepturen aus den erzeugten Sanden und Splitten Ggf. können Rezepturen entwickelt werden, die vollständig aus Produkten der Firma FEES bestehen: aus Betonrezyklaten einerseits sowie aus Sanden und Splitten andererseits. Mit Ausnahme des Zements enthielten diese Betone keine primären Rohstoffe mehr.

Literaturverzeichnis

- [1] Deutsches Ressourceneffizienzprogramm, Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen, 2015
- [2] Umweltbundesamt, Die Nutzung natürlicher Ressourcen. Bericht für Deutschland 2016, Dessau 2016
- [3] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Deutschland – Rohstoffsituation 2017, Hannover 2018
- [4] Kreislaufwirtschaft Bau (Hg), Mineralische Bauabfälle – Monitoring 2016. Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahre 2016, Berlin 2019
- [5] TL Gestein StB 04:2007, Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau
- [6] TL SoB StB 04, Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau
- [7] DIN EN 12620, Gesteinskörnungen für Beton
- [8] DIN EN 13043, Gesteinskörnungen für Asphalt und Oberflächenbehandlungen für Straßen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen
- [9] DIN EN 13450, Gesteinskörnungen für Gleisschotter
- [10] LAGA M 20, Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen - Technische Regeln
- [11] DIN 4226-101, Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 - Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen
- [12] Umweltministerium Baden-Württemberg (Hg), Leitfaden zum Einsatz von R-Beton, 2017 <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/service/publikationen/publikation/did/leitfaden-zum-einsatz-von-r-beton/>
- [13] DAFStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620, 2010:09
- [14] HTWG Konstanz / ifeu Heidelberg, R-Beton in Betonfertigteilen und –waren, Forschungsprojekt gefördert von der Baden-Württemberg Stiftung, 2016 <https://fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/121299/?COMMAND=DisplayBericht&FIS=203&OBJECT=121299&MODE=METADATA>
- [15] DAFStb-Richtlinie Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkaliaktion im Beton (Alkali-Richtlinie). Ausgabe 2013
- [16] VDZ, Teilvorhaben 5. RC-Gesteinskörnung – Anwendung im Zement, Ökobilanzierung der Zement- und Betonherstellung, Bewertung der Alkaliempfindlichkeit; Forschungsprojekt R-Beton; gefördert vom BMBF, <https://www.r-beton.de/teilverhaben/teilverhaben-5/>
- [17] DIN 1053, Mauerwerk - Berechnung und Ausführung
- [18] DIN 18550 DIN 18550-1:2018-01, Planung, Zubereitung und Ausführung von Außen- und Innenputzen - Teil 1: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 13914-1:2016-09 für Außenputze
- [19] DIN 18560-1:2015-11, Estriche im Bauwesen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Prüfung und Ausführung
- [20] DIN EN 771-2:2015-11, Festlegungen für Mauersteine - Teil 2: Kalksandsteine; Deutsche Fassung EN 771-2:2011+A1:2015
- [21] Wolfgang Eden / Bernhard Middendorf, Entwicklung eines Recycling-Mauersteins unter Verwendung von Abbruchmaterial und Baurestmassen und Anwendung der Kalksandstein-Technologie, Fraunhofer IRB Verlag, 2009
- [22] Herbert Pöllmann, Jürgen Göske, Bauschäden durch Mineralische Treiberscheinungen, in Die Aktuelle-Wochenschau der GDCh – Bauen und Chemie 40/2011
- [23] HAGELAUER, W. & WOLFF, G. (1993): Technische Verwertung von Bodenaus-hub. – In: Umweltministerium Baden-Württemberg (Hrsg.): Luft-Boden-Abfall, Heft 24, 95 S., 18 Abb., 20 Tab., 4 Anlagen; Stuttgart.
- [24] Fa. Leipfinger & Bader, Erdaushübe als Rohstoff, in Baustoffpraxis 5/2018
- [25] Schmidt, H.: Neuere Erkenntnisse über den Einfluß des Mineralbestandes auf die technologische Eigenschaften und Brennverhalten einiger Ziegeltoner, 1981
- [26] Hatzl, T.; Gehlken, P.-L.: Mineralische Rohstoffe in der Ziegelindustrie – Wichtige Parameter in der täglichen Praxis des Geowissenschaftlers (Teil 1). Z. Ziegelind. Internat. 54(2001) [11] 23–32

- [27] <https://www.dachverband-lehm.de/lehmbau/lehmbaustoffe>
- [28] DIN 18946:2013-08, Lehmmauermörtel - Begriffe, Anforderungen, Prüfverfahren
- [29] DIN 18947:2013-08, Lehmputzmörtel - Begriffe, Anforderungen, Prüfverfahren
- [30] DIN 18945:2013-08, Lehmsteine - Begriffe, Anforderungen, Prüfverfahren
- [31] FGSV, Hinweise zur Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen Verfüllbaustoffen im Erdbau H ZFSV, Köln 2012
- [32] Umweltbundesamt: Bewertung in Ökobilanzen; UBA-Texte 92/99 (1999); Berlin.
- [33] Umweltbundesamt: Nationale Trendtabellen für die Berichterstattung atmosphärischer Emissionen (Luft) (Dezember 2013); Dessau
- [34]
- [35] Umweltbundesamt: National Trend Tables for the German Atmospheric Emission Reporting (POP) (Januar 2014); Dessau
- [36] ABEB AG Energiebilanzen e.V.: Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2013
- [37] Statistisches Bundesamt (Destatis):
<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltoekonomischeGesamtrechnungen/MaterialEnergiefluesse/Tabellen/MaterialEnergiefluesse.html>; online abgerufen im September 2018.