

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Sciences

Verfahrenstechnische Untersuchung der Recyclingfähigkeit

mineralischer Siebsandfraktionen aus Bauabfällen

Bachelorthesis

Verfahrenstechnik

vorgelegt von

Borislav Klebaner



Hamburg

am 22. Dezember 2019

Gutachter: Prof. Dr. Martin Geweke (HAW Hamburg)

Gutachter: Dipl.-Ing. Olaf Hartig (Buhck GmbH und Co. KG)

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Hamburg, 22.12.2019

Borislav Klebaner

Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei meinen Betreuern Herrn Dipl.-Ing Olaf Hartig und Herrn Prof. Dr. Martin Geweke herzlich bedanken. Diese beiden Herren haben mir die Erstellung dieser Abschlussarbeit ermöglicht. Diverse Unsicherheiten wurden durch Ratschläge seitens meiner Betreuer beseitigt.

Herrn Dipl.-Ing Olaf Hartig gilt mein Dank für die Vergabe des Themas und die Möglichkeit, diese Abschlussarbeit nach eigenem Ermessen zu verfassen.

Herrn Prof. Dr. Martin Geweke danke ich für die Hilfestellung bei verfahrenstechnischen Zusammenhängen mechanischer Art.

Die hilfsbereite Einstellung und Unterstützung beider Betreuer hat mir verholfen, diese Arbeit in die richtige Bahn zu lenken, nicht zuletzt durch tatkräftige Impulse dieser Herren.

Mein Dank gebührt ebenfalls den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Unternehmens Buhck in Wiershop, die mir stets zur Seite standen und Hilfestellung geleistet haben. Insbesondere Frau Sabine Bamberg, Frau Sandra Müller, Frau Elvira Kissmann, Frau Bente Bahr sowie den Herren Yannick Hoffmann, Wolfgang Mrose, Jens Butt und Rolf Burmester.

Weiterhin möchte ich dem Laboringenieur Herrn Marc Hannappel danken, der mir die Nutzung des Hochschullabors ermöglicht hat und bei Fragen zur Verfügung stand.

Der größte Dank richtet sich an meine Familie, die mir den Weg dieses Studiums ermöglicht haben und durch die diese Arbeit zustande gekommen ist. Die permanente Unterstützung, die meine Eltern und mein Bruder mir entgegengebracht haben, hat mich ermutigt, diese Arbeit über die gesamte Dauer anzufertigen.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung.....	II
Danksagung.....	III
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis.....	IX
1 Einleitung und Motivation	1
2 Aufgabenstellung.....	3
3 Theoretische Grundlagen	4
3.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen und Verordnungen	6
3.1.1 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)	7
3.1.2 Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV)	8
3.1.3 Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA)	10
3.1.4 Deponieverordnung (DepV)	13
3.1.5 Ersatzbaustoffverordnung (EBV)	14
3.2 Relevante Untersuchungsparameter	15
3.2.1 Chlorid.....	15
3.2.2 Sulfat	16
3.2.3 Leitfähigkeit	16
3.2.4 TOC	17
3.2.5 DOC	18

3.3 Theorie der Aufbereitungsmethoden	19
3.3.1 Zerkleinerung	20
3.3.2 Sichtung	22
3.3.3 Siebung	23
3.4 Konzepte zur Störstoffreduzierung	24
3.5 Einsatzmöglichkeiten von recyceltem Siebsand	29
4 Messapparaturen und Gerätschaften	31
4.1 Zickzacksichter	31
4.2 Siebturm.....	32
4.3 Ionenchromatograph	33
4.4 Primacs / Formacs Analyzer	35
5 Stand der Technik	37
6 Experimenteller Teil.....	38
6.1 Erkenntnisse aus Vorversuchen	38
6.2 Mechanische Vorgehensweise	41
6.3 Analytische Vorgehensweise	44
7 Ergebnisse und Diskussion.....	44
8 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	56
9 Umgang des Recyclingaspekts im Ausland	58
10 Zusammenfassung und Ausblick.....	59

Literaturverzeichnis	61
Anhang.....	68

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bundesweites Abfallaufkommen (in 1.000 t) zwischen 1996-2005 [1, S.39].....	1
Abbildung 2 : Verwertete und beseitigte Bau- und Abbruchabfälle in t/a (Berlin 2003 - 2017) [2, S.22]	2
Abbildung 3: Zusammensetzung von Baumischabfällen [4, S.9]	5
Abbildung 4: Diverse Stoffanteile von Baumischabfall [4, S.15].....	6
Abbildung 5: Übersicht der vorhandenen Einbauklassen und Zuordnungswerte [12, S.14].....	12
Abbildung 6: Bruchflächenverlauf und Simulation nach einem Aufprall einer Betonkugel [29, S.66]	21
Abbildung 7: Wirkungsweise einer Querstromtrennung im Zick-Zack-Kanal [30].....	23
Abbildung 8: Beispielhafte Aufbereitungsabfolge belasteter Bauabfälle [29, S.106].	25
Abbildung 9: Aufbau und Funktionsweise eines Hydrozyklons [34]	27
Abbildung 10: Verwertungswege für Sand (2016) [38, S.26]	29
Abbildung 11: Übersicht mineralischer Baustoffe und deren Verwendung [39, S.356]	30
Abbildung 12: Schema des Aufbaus eines Zick-Zack-Sichters [41].....	31
Abbildung 13: Siebturm der Firma Retsch [42]	33
Abbildung 14: Prozessschritte für die Ionenanalyse [44, S.2]	34
Abbildung 15: Wirkungsweise für die Ermittlung des TOC-Wertes [45, S.3]	36
Abbildung 16: Prozentuale Massenverteilung der Korngröße 0,063 - 2 mm bei verschiedener Siebdauer	40

Abbildung 17: Fein- und Grobfraktion der Probe 1	42
Abbildung 18: Draufsicht Feinfraktion 0-5,6 mm	43
Abbildung 19: Draufsicht Grobfraktion 5,6-8 mm	43
Abbildung 20: Leitfähigkeit der einzelnen Proben.....	48
Abbildung 21: Leitfähigkeit der einzelnen Proben im Vergleich mit Grenzwerten	49
Abbildung 22: Sulfatgehalt der einzelnen Proben im Vergleich mit Grenzwerten	50
Abbildung 23: Chloridgehalt der einzelnen Proben im Vergleich mit Grenzwerten ...	51
Abbildung 24: TOC-Gehalt der einzelnen Proben im Vergleich mit Grenzwerten	52
Abbildung 25: DOC-Gehalt der einzelnen Proben im Vergleich mit Grenzwerten	54

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispielhafte Leitfähigkeiten von verschiedenem Wasser [24, S.5]	17
Tabelle 2: Übersicht der massenanteiligen TOC-Grenzwerte für Deponieklassen gemäß DepV [27, S.2].....	18
Tabelle 3: Übersicht der DOC-Grenzwerte für Deponieklassen gemäß DepV [27, S.3]	18
Tabelle 4: Übersicht eingesetzter Zerkleinerungsmaschinen für definierte Zielkorngößen [1, S.140].....	22
Tabelle 5: Windsichten	39
Tabelle 6: Übersicht der Massenanteile nach Siebdauern von 5 und 15 Minuten	41
Tabelle 7: Deponieklassen für relevante Stoffe / Parameter [27]	45
Tabelle 8: Zuordnungswerte für relevante Stoffe / Parameter in Bodenanwendungen [27]	45
Tabelle 9: Zuordnungswerte für relevante Stoffe / Parameter für Bauschutt [48]	45
Tabelle 10: Übersicht der untersuchten Größen für Siebsand von 0 - 5,6 mm	46
Tabelle 11: Übersicht der untersuchten Größen für Siebsand von 5,6 - 8 mm	47
Tabelle 12: Entsorgungskosten für 1 Tonne Siebsand	56
Tabelle 13: Entsorgungskosten für 1 Tonne Siebsand bei veränderter Zusammensetzung	57

1 Einleitung und Motivation

Die Abfallwirtschaft hat einen großen Stellenwert in der Ressourcenwirtschaft erlangt. Diese Tatsache wird anhand des weltweit zunehmenden Verbrauchs an Rohstoffen und fossilen Energieträgern deutlich. Auch die Kapazitäten an fossilen und mineralischen Ressourcen gehen zurück, wodurch die Situation verschärft wird und Lösungsstrategien angestrebt werden [1, Vorwort].

Bundesweit werden Abfälle aller Art in der Größenordnung von 330 bis 400 Millionen Tonnen statistisch erfasst, wovon der Großteil nach Bau- und Abrissarbeiten anfällt. 55 bis 60 % des gesamten Abfallaufkommens wird durch Bau- und Abbruchabfälle abgedeckt. Allerdings handelt es sich bei den mineralischen Bau- und Abbruchabfällen um Rohstoffe, aus denen sich durch entsprechende Aufbereitungsschritte hochwertige Baustoffe gewinnen lassen [1, S.2]

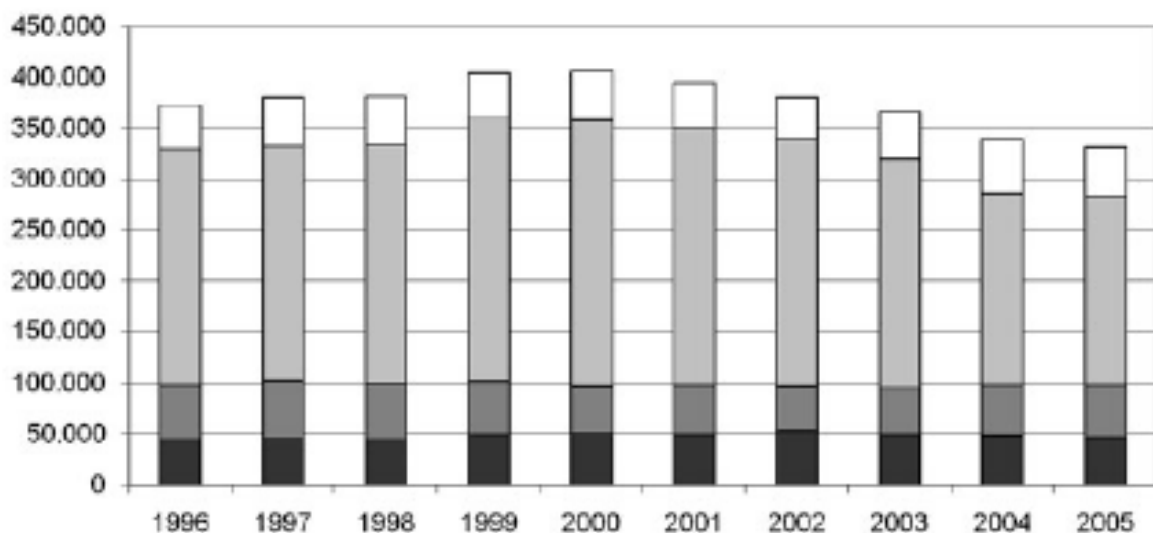


Abbildung 1: Bundesweites Abfallaufkommen (in 1.000 t) zwischen 1996-2005 [1, S.39]

- Siedlungsabfälle
- Bergematerial aus dem Bergbau (nicht gefährliche Abfälle)
- Bau- und Abbruchabfälle (einschließlich Straßenaufbruch)
- Abfälle aus Produktion und Gewerbe

Der dominierende Anteil der Abfallart aus Bau- und Abbruchtätigkeiten unterstreicht in der Abbildung 1 die Bedeutung und damit das Potenzial, die von jenen Abfällen ausgehen. Den Bau- und Abbruchabfällen gegenübergestellt sind Siedlungsabfälle, Abfälle aus Gewerbe und Produktion sowie aus dem Bergbau stammendes Bergmaterial. Gemäß der Abbildung ist bis zur Jahrtausendwende ein stetiger Anstieg von Bau- und Abbruchabfällen zu beobachten, wobei die gegenübergestellten Abfallarten nahezu konstante Abfallmengen aufzeigen. Allerdings hat sich das Abfallaufkommen hinsichtlich der Bau- und Abbruchabfälle beginnend ab dem Jahr 2000 verringert, was auf vermehrt eingesetzte Recyclingmaßnahmen zurückzuführen ist.

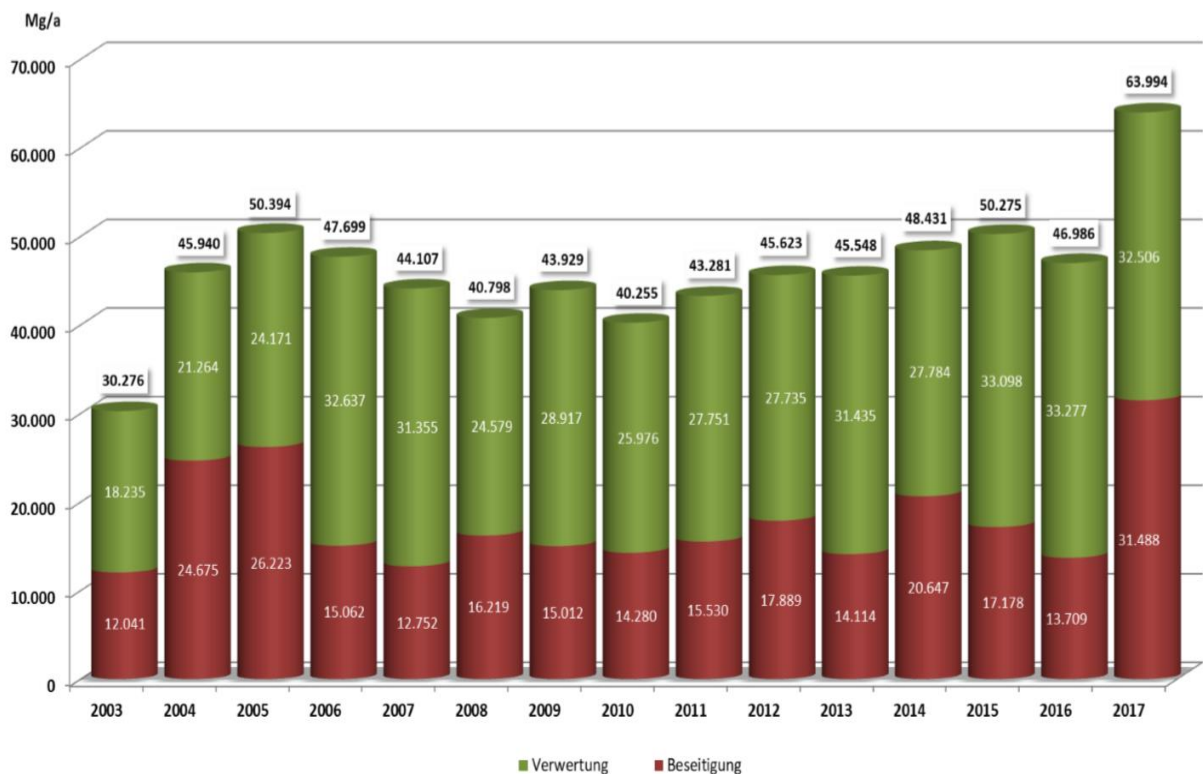


Abbildung 2 : Verwertete und beseitigte Bau- und Abbruchabfälle in t/a (Berlin 2003 - 2017) [2, S.22]

Abbildung 2 veranschaulicht die Entsorgungsbilanz angefallener Bau- und Abbruchabfälle der Abfallarten Glas, Holz, Kunststoff und Dämmmaterial beispielhaft für Berlin im Zeitraum 2003 bis 2017. Mit Entsorgung ist eine Verwertung oder Beseitigung gemeint. Im Schnitt sind jährlich etwa 45.000 Tonnen an Abfällen aus Bau- und Abbruchmaßnahmen angefallen, wobei der Anteil der verwerteten Mengen mit durchschnittlich

28.000 Tonnen pro Jahr gegenüber den Mengen beseitigter Bau- und Abbruchabfälle von 17.000 jährlichen Tonnen überwiegt. Deutlich wird die Umverteilung des Verhältnisses von verwerteten zu beseitigten Mengen ab dem Jahr 2006. Mit Ausnahme des Jahres 2017 (Verwertung in nahezu gleichem Mengenanteil wie Beseitigung) lässt sich eine ungefähre Verteilung von zwei Drittel an verwerteter Menge zu einem Drittel beseitigter Menge erkennen. Soweit möglich, wird angestrebt und bevorzugt, den Weg über die Verwertung zu nehmen, anstatt den aufkommenden Bau- und Abbruchabfall gänzlich Beseitigungsanlagen zuzuführen.

2 Aufgabenstellung

Die Buhck GmbH & Co. KG zählt zu den größten Umweltdienstleistern im Norden Deutschlands. Ein Schwerpunkt der Arbeit des Unternehmens liegt in der Sortierung von Bau- und Gewerbeabfällen sowie deren Lagerung auf Deponien im Fall, dass die Abfälle nicht weiter verwertungsfähig sind.

Im Rahmen dieser Ausarbeitung soll untersucht werden, inwieweit und durch welche Mittel Siebsand - eine abgesiebte Fraktion mineralischer, inhomogener Zusammensetzung - recyclingfähig aufbereitet und auf diese Weise soweit möglich in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden kann.

Die Schwierigkeit bezüglich des Siebsandes beruht auf der Tatsache, dass das gegenwärtige Entsorgungskonzept lediglich über den Weg der Deponierung geht, da der Anteil an Störstoffen (u.a. Chlorid, Sulfat) zu hoch ist, um Siebsand einer Verwertung zuführen zu können. Allerdings besteht die Problematik, dass die vorhandenen Kapazitäten, die auf den Deponien zur Verfügung stehen, kontinuierlich geringer werden.

Es wird angestrebt, den Siebsand nach dessen Behandlung in kostengünstigeren Deponieklassen zu lagern, wo die Schadstoffbelastung - ausgehend vom Abfall - geringere Grenzwertgehalte aufweist. Idealerweise könnte ein Anteil des Siebsandes wiederverwertet und je nach Fein- bzw. Grobanteil in diversen Bereichen (Verfüllung, Hoch-/Tiefbau, Zement-/Betonherstellung) Verwendung finden.

Anfallende Bauabfälle einer Halde, die mineralischen Bauschutt und organische Bestandteile beinhalten, werden mithilfe einer vertikal angeordneten Siebvorrichtung in zwei Siebschnitte von 0-5,6 mm und 5,6-8 mm aufgeteilt. Dabei entstehen jeweils fünf Proben, deren Partikelgröße sich zwischen 0-5,6 mm bzw. 5,6-8 mm befindet. Diese Proben werden diversen Analyseverfahren unterzogen, um die für die Siebsandaufbereitung und Deponierung relevanten Parameter Leitfähigkeit, Chlorid- und Sulfatgehalt, den gelösten organischen Kohlenstoffanteil (DOC) sowie den Gesamtkohlenstoffanteil (TOC) der Proben zu ermitteln. Im Fall von Chlorid und Sulfat wird die Ionenchromatographie genutzt, bei der eine Ladungstrennung der Ionen von Stoffen erfolgt, wodurch die Ionenkonzentration von Chlorid und Sulfat in einem Diagramm generiert wird.

Anhand der entstehenden Untersuchungsergebnisse der Proben kann entschieden werden, ob und welche Fraktionen hinsichtlich kritischer Parameter für bestimmte Einsatzgebiete in Frage kommen.

Diese Arbeit soll einen Vergleich unterschiedlicher Lösungsvorschläge für die beschriebene Problematik bieten. Alle erarbeiteten Strategien, Verfahren und Lösungsansätze zielen darauf ab, den Entsorgungs- bzw. Verwertungsprozess möglichst ökonomisch wie auch umwelt- und ressourcenschonend zu gestalten.

3 Theoretische Grundlagen

Zunächst wird auf den Sammelbegriff „Baumischabfall“ eingegangen, innerhalb dessen sich weitere für das Verständnis dieser Arbeit relevante Begriffe eingliedern und unterordnen. Nachfolgend wird die Unterteilung von Baumischabfall kategorisiert. Diese Art von Abfall setzt sich aus Bauschutt und organischen Bestandteilen zusammen. Unter Bauschutt fallen folgende Stoffe [3, S.14]:

- Beton
- Ziegel
- Fliesen und Keramik

Den restlichen Teil bildet Material, das überwiegend organische Anteile beinhaltet und nachfolgend zu sehen ist.

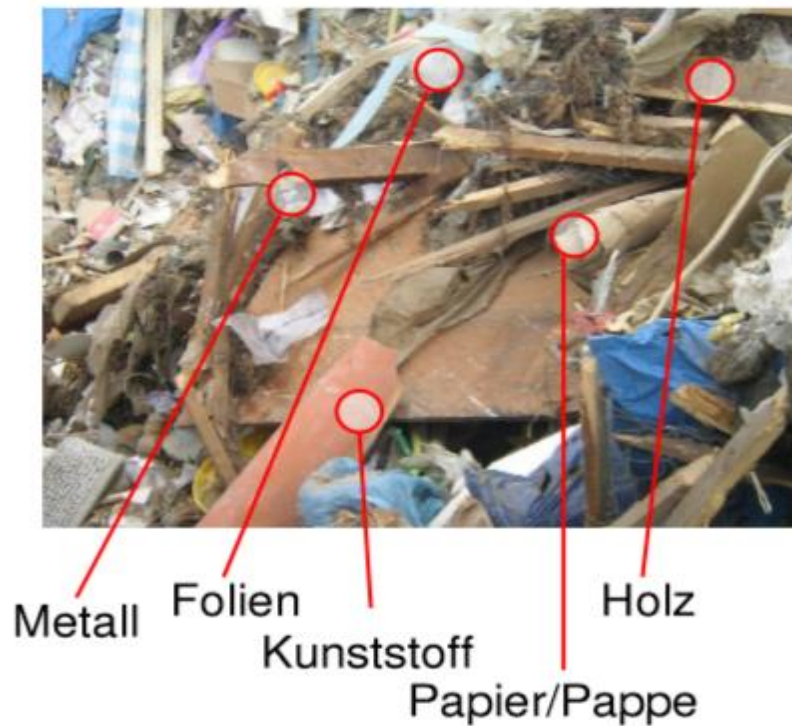


Abbildung 3: Zusammensetzung von Baumischabfällen [4, S.9]

In Abbildung 3 werden im Baumischabfall vorkommende Bestandteile veranschaulicht. Die aufgeführten Stoffe sind für ein Recyclingverfahren nachteilhaft und werden dementsprechend mittels diverser Verfahren entfernt beziehungsweise auf ein Minimum verringert. Auf jene Verfahren wird in den Kapiteln 3.3 sowie 3.4 eingegangen.

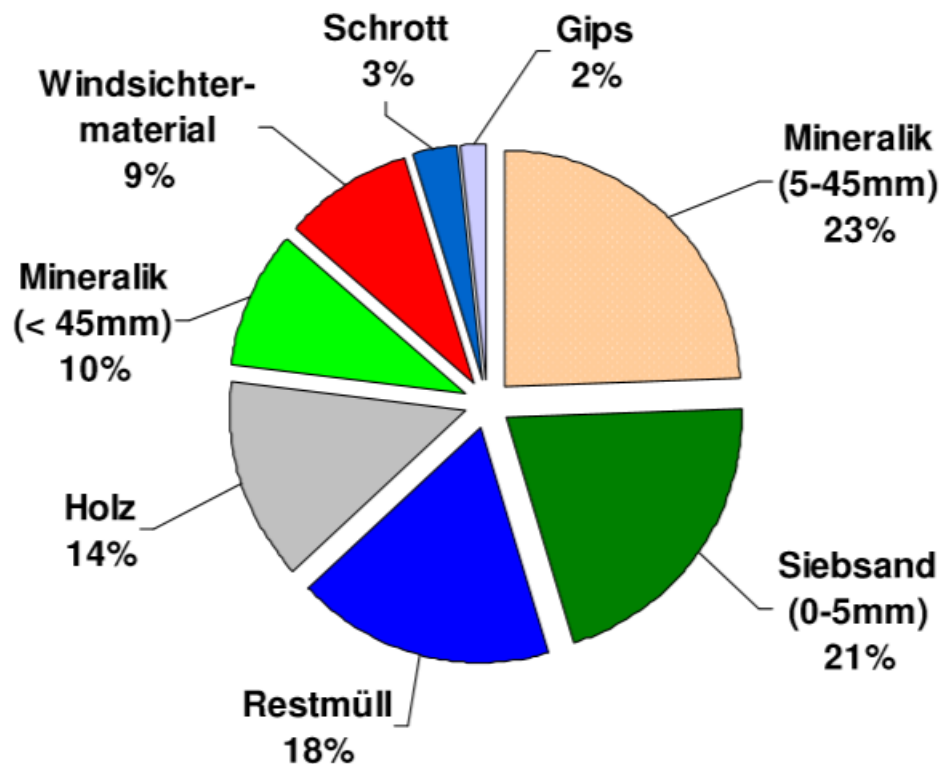


Abbildung 4: Diverse Stoffanteile von Baumischabfall [4, S.15]

Baumischabfall setzt sich aus einer Reihe von Substanzen zusammen (Abbildung 4). Der im Rahmen dieser Arbeit ausschlaggebende Siebsand nimmt mit 21 Prozent über ein Fünftel des Anteils am Baumischabfall ein. Zusammen mit der Mineralik, womit der Bauschutt gemeint ist, macht der Siebsand über die Hälfte (54 Prozent) des Baumischabfalls aus. In den restlichen Anteil fallen Holz, Schrott, Gips, jeglicher Restmüll sowie Material, das aus Windsichtanlagen stammt, die der Baumischabfall durchlaufen hat.

3.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen und Verordnungen

Im Gebiet der Abfallbehandlung existieren eine Reihe von Gesetzen sowie Verordnungen, denen Folge zu leisten ist und nach denen sich Betreiber von Abfallanlagen wie auch Erzeuger sämtlicher Abfallarten zu richten haben. Die wesentlichen Vorschriften werden nachfolgend aufgelistet.

3.1.1 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)

Das am 1. Juni 2012 eingeführte Kreislaufwirtschaftsgesetz hat zum Ziel, die Erhaltung natürlicher Ressourcen durch die Förderung der Kreislaufwirtschaft zu gewährleisten sowie die Sicherheit von Mensch und Umwelt bei der Herstellung und Bewirtschaftung von Abfällen zu bewahren. [5, § 1, KrWG]

Unter dem Begriff Kreislaufwirtschaft wird ein in sich geschlossenes System verstanden. Dabei handelt es sich um vorhandene Ressourcen und Materialien, die nach Möglichkeit und gegebenen Umständen über einen längeren Zeitraum genutzt und behandelt werden. Dies geschieht mitunter in Form der Wiederverwendung oder des Recyclings, sodass der Lebenszyklus bestehender Rohstoffe und Materialien länger andauert und demzufolge anfallende Abfallmengen effektiv verringert werden können [6]. Insofern stellt die Kreislaufwirtschaft ein Modell der Produktion und des Verbrauchs dar, innerhalb dessen Materialien für diverse Einsatzzwecke einen Nutzen finden und nach deren Gebrauch keiner Entsorgung zugeführt werden, sondern eine Materialrückführung in den Wertstoffkreislauf erfolgen kann [7].

Gemäß § 6 des KrWG ist folgende hierarchisch angeordnete Abfallbehandlung vorzunehmen [8]:

1. Vermeiden von Abfällen
2. Wiederverwendung
3. Abfallrecycling
4. Anderweitige Verwertung (energetisch oder Verfüllen)
5. Beseitigung von Abfällen

3.1.2 Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV)

Die Gewerbeabfallverordnung regelt seit ihrem Erlass am 01.01.2003 den Umgang mit Abfällen aus dem gewerblichen Bereich. Eine Neufassung der Verordnung liegt seit dem 01.08.2017 vor.

§ 1 Anwendungsbereich

Absatz 1

Diese Verordnung betrifft im Wesentlichen die Vorbehandlung, das Vorbereiten für die Wiederverwendung, das Recycling und die sonstige Verwertung folgender Abfallarten [9, S.2]:

- gewerbliche Siedlungsabfälle
- Bau- und Abbruchabfälle

Absatz 2

Diese Verordnung gilt für

- I. Erzeuger und Besitzer der in Absatz 1 genannten Abfälle und
- II. Betreiber von Vorbehandlungs- und Aufbereitungsanlagen.

In Bezug auf Bau- und Abbruchabfälle sind die Paragraphen 8 und 9 von Bedeutung, die nachstehend erläutert werden [9, S.10-12].

§ 8 Getrennte Sammlung, Vorbereitung zur Wiederverwendung und Recycling von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen

Absatz 1

Nach § 8 sind Erzeuger und Besitzer von Bau- und Abbruchabfällen verpflichtet, nachfolgende Abfallfraktionen jeweils getrennt zu sammeln, zu befördern und der Vorbereitung zur Wiederverwendung oder dem Recycling zuzuführen. Dabei handelt es sich um folgende Abfallfraktionen:

- Glas
- Metalle
- Kunststoff
- Holz
- Bitumengemische
- Dämmmaterial
- Baustoffe auf Gipsbasis
- Ziegel
- Beton
- Fliesen und Keramik

Absatz 2

In Absatz 1 muss den Pflichten nicht nachgegangen werden, wenn das getrennte Sammeln der jeweiligen Abfallfraktion auf technischem Wege nicht möglich oder wirtschaftlich nicht zumutbar ist.

Eine getrennte Sammlung ist technisch nicht möglich, wenn zu hoher Platzbedarf für Abfallbehälter besteht. Ebenfalls ausgeschlossen ist die Getrenntsammlung der mineralischen Abfälle Ziegel, Beton sowie Fliesen und Keramik (in Absatz 1 aufgeführt) im Fall rückbautechnischer Gründe.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist ein getrenntes Sammeln nicht zumutbar, wenn die Kosten dafür stark von den Kosten für eine gemischte Sammlung und eine anschließende Vorbehandlung oder Aufbereitung abweichen. Dies liegt infolge starker Verschmutzungsgrade oder bei unzureichenden Mengen der jeweiligen Abfallfraktion vor.

Absatz 3

Diesem Absatz zufolge besteht eine Dokumentationspflicht der Abfallerzeuger wie auch Besitzer von Abfällen. Demnach ist die Erfüllung der Pflichten in Bezug auf Absatz 1 in schriftlicher Form festzuhalten.

§ 9 Vorbehandlung und Aufbereitung bestimmter Bau- und Abbruchabfälle

Absatz 1

Für den Fall nicht getrennt gehaltener Abfälle müssen Erzeuger wie auch Besitzer von Bau- und Abbruchabfällen folgenden Tätigkeiten nachkommen:

- Vorbehandlung von Zusammensetzungen, die hauptsächlich Metalle, Kunststoffe und Holz beinhalten
- Aufbereitung von Zusammensetzungen, die größtenteils Ziegel, Beton, Fliesen und Keramik beinhalten

Sofern keinerlei Beeinträchtigung durch

- Dämmmaterial, Glas, Bitumengemische wie auch Baustoffe auf Gipsbasis
- Ziegel, Beton, Fliesen und Keramik

entsteht, sind diese Abfälle in der Zusammensetzung erlaubt.

3.1.3 Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA)

Durch die im Jahr 1963 gegründete Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) wurde ein Gremium geschaffen, das zum Ziel hat, die Verwendung des Abfallrechts in Deutschland zu vereinheitlichen [10].

Die LAGA umfasst insgesamt 38 Mitteilungen, von denen der Großteil ihre Gültigkeit verloren hat. Mit Mitteilungen sind die verschiedenen Themenbereiche gemeint.

Von besonderer Bedeutung ist die Mitteilung M 20, bei der es sich um die Anforderungen an die stoffliche Verwertung mineralischer Reststoffe bzw. Abfälle handelt. Diese Mitteilung hat ihre Gültigkeit ab 2003 und gliedert sich in drei Teilbereiche [11, S.2]:

- I. Allgemeiner Teil
- II. Abfallspezifische Anforderungen (Technische Regeln)
- III. Probenahme und Analytik

Teil I umfasst allgemein gültige Rahmenbedingungen für die schadlose Verwertung. Unter die abfallspezifischen Anforderungen (Teil II) fallen Untersuchungs- und Bewertungskriterien mineralischer Abfälle wie auch definierte Zuordnungswerte, die im späteren Verlauf erläutert werden. Der dritte Teil beinhaltet Vorgehensweisen bei der Probenahme, der Aufbereitung sowie der Analytik der Proben. Auf Teil III wird in den Kapiteln 4.3, 4.4 sowie 6.3 eingegangen.

Darüber hinaus bezieht sich dieses Regelwerk auf die Bewertung der schadlosen Verwertung von:

- mineralischen Abfällen für die Erzeugung von Bauprodukten
- mineralischen Abfällen, deren Einbau in technischen Bauwerken in ungebundener oder gebundener Form erfolgt

Die LAGA Mitteilung 20 definiert Einbauklassen, innerhalb derer festgelegte Kriterien für den Einbau mineralischer Abfälle vorliegen. Dabei fungieren Zuordnungswerte als Parameter, die die einzelnen Einbauklassen voneinander abgrenzen. Dies geschieht durch von den Zuordnungswerten vorgegebene Schadstoffanteile im Feststoff beziehungsweise im Eluat, sodass der Abfall unter jenen Anforderungen zum Einsatz kommen kann. Unter dem Begriff Eluat wird ein Gemisch aus einem Lösungsmittel (deionisiertes H₂O) sowie Substanzen, die aus einem festen Abfall herausgelöst wurden, bezeichnet.

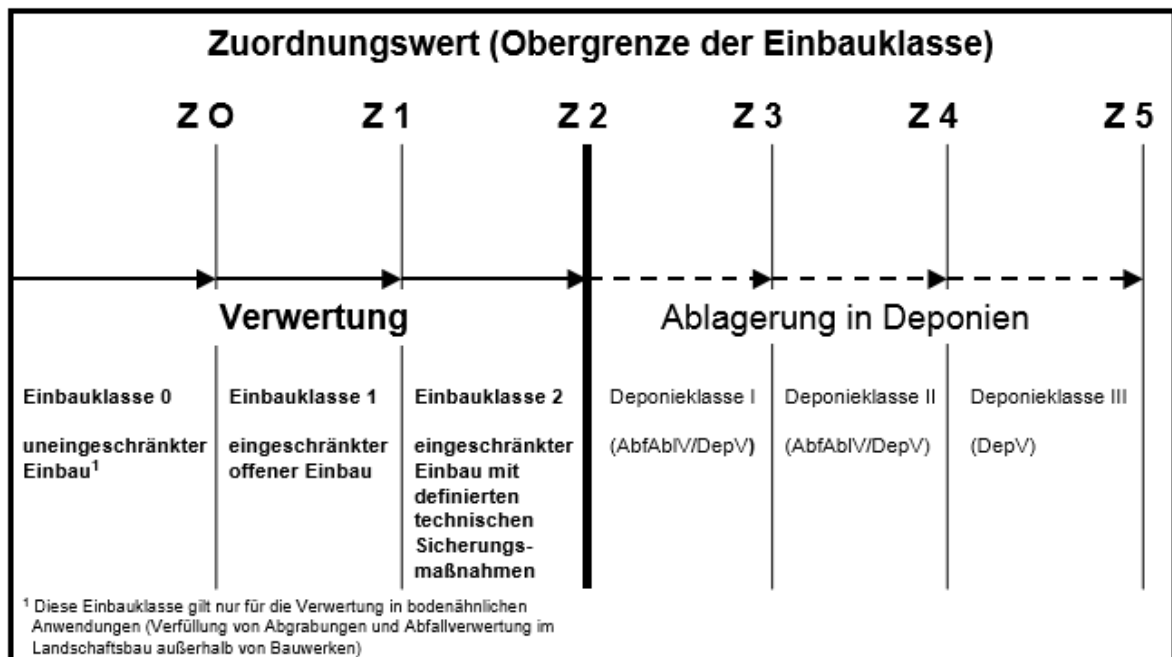


Abbildung 5: Übersicht der vorhandenen Einbauklassen und Zuordnungswerte [12, S.14]

In Abbildung 5 sind die einzelnen Zuordnungswerte Z0 bis Z5 sowie die zugehörigen Einbau- beziehungsweise Deponieklassen dargestellt. Dabei entsprechen Z0 bis Z2 jeweils den Einbauklassen 0 bis 2, während die Deponieklassen I bis III den Zuordnungswerten Z3 bis Z5 entsprechen. „Eingeschränkter offener Einbau“ bedeutet, dass der eingebaute Abfall von Wasser durchsickert werden kann. Bei der Einbauklasse 2 werden zudem Sicherungsvorkehrungen getroffen, indem eine wasserundurchlässige Deckschicht dafür sorgt, dass der darunter eingebaute Abfall nicht oder nur unbedeutend von Wasser durchsickert wird. Davon abgesehen existieren noch die Deponieklassen DK 0 und DK IV, bei denen es sich um Sonderfälle handelt und auf die in Kapitel 3.1.4 eingegangen wird.

Für die drei Einbauklassen ist der Weg der Verwertung möglich, wohingegen Abfälle höherer Schadstoffgehalte abhängig von der Belastung deponiert werden. An dieser Stelle greifen die Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV) sowie die Deponieverordnung (DepV). Auf Zweitere wird in Kapitel 3.1.4 eingegangen. Die Abfallablagerungsverordnung wird nicht näher erläutert, zumal diese sich auf Siedlungsabfälle bezieht und es nicht Gegenstand der Betrachtung ist.

Das Ausmaß der Schadstoffbelastung in mineralischen Abfällen kann bestimmte Anforderungen bei einem offenen Einbau aufgrund von Überschreitung nicht erfüllen. Daher ist notwendig, für eine schadlose Verwertung von Teilen des Abfalls neben dem eingeschränkten offenen Einbau (Einbauklasse 1) einen eingeschränkten Einbau mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen (Einbauklasse 2) vorzusehen. Bei Überschreitung der Schadstoffgehalte (Zuordnungswerte), die für die Verwertung ausschlaggebend sind, kann mit zu verwertenden Abfällen folgendermaßen umgegangen werden:

- Abtrennung und anschließende umweltverträgliche Entsorgung der Schadstoffe
- Schadstoffzerstörung durch zweckmäßige Methoden

Stellt sich diese Vorgehensweise als nicht machbar oder ungeeignet heraus, sind davon betroffene Abfälle zu beseitigen.

Zur Verwertung in Frage kommende Abfälle sollen als Ersatz für Primärrohstoffe dienen und den technischen Anforderungen gerecht werden, die an jene Abfälle gestellt werden. Anhand der Verwendung der stofflichen Abfalleigenschaften wird das Ziel dieses Vorgehens dargestellt [13].

3.1.4 Deponieverordnung (DepV)

Die Deponieverordnung besitzt ihre Gültigkeit bei der Errichtung und dem Betrieb von Deponien sowie auch für den Fall der Stilllegung einer Deponie. Weiterhin gilt es für die Abfallbehandlung anlässlich deren Ablagerung auf Deponien sowie der Verwendung von Abfällen als Deponieersatzbaustoff wie auch der Herstellung von Deponieersatzbaustoffen.

Darüber hinaus haben nachstehend aufgeführte Funktionsträger der DepV Folge zu leisten [14, S.1]:

- Betreiber und Inhaber von Deponien
- Erzeuger und Besitzer von Abfällen

- Träger eines Deponievorhabens
- Betreiber von Anlagen zur Herstellung von Deponieersatzbaustoff

Die DepV unterscheidet insgesamt fünf verschiedene Deponieklassen:

Deponien der Klasse 0 (DK 0) umfassen oberirdisch angelegte Deponien für Inertabfälle. Gemeint sind damit Abfälle, die keinen erheblichen Veränderungen chemischer, physikalischer oder biologischer Art unterliegen. Ferner weisen Inertabfälle keine hohen Schadstoffanteile auf, sind zudem nicht brennbar und es findet kein biologischer Abbau dieser Abfallart statt. Andere Materialien mit direktem Kontakt zu Inertabfällen sind von einer Beeinträchtigung, ausgehend von Inertabfällen, insofern nicht betroffen, als dass das Material sich nicht negativ auf Mensch und Umwelt auswirkt. Zu Inertabfällen zählen neben Bodenaushub auch vorsortierte mineralische Bau- und Abbruchabfälle, die nichtmineralische Fremdbestandteile in geringem Maße enthalten [15].

Bei den Deponieklassen DK I bis DK III handelt es sich wie bei DK 0 um oberirdische Deponien. Allerdings liegen für jede dieser Deponieklassen beziehungsweise für die jeweiligen Abfälle entsprechend unterschiedliche Zuordnungskriterien vor. Deponien höherer Klasse sind vorgesehen, je stärker schad- bzw. störstoffbelastet der Abfall ist.

DK III differenziert gefährlichen von nicht gefährlichem Abfall. Abfälle, von denen eine Gefahr ausgeht, werden der DK III zugeordnet, bei der die höchsten Grenzwerte für Stoffe und/oder Parameter definiert sind.

Die DK IV besitzt für das Hauptaugenmerk Siebsand keine Relevanz, da es sich bei dieser DK um Untertagedeponien (im Bergwerk oder in einer Kaverne) handelt [16].

3.1.5 Ersatzbaustoffverordnung (EBV)

In der Ersatzbaustoffverordnung geht es im Wesentlichen um den Umgang mit mineralischen Ersatzbaustoffen und einer Erweiterung ihrer Verwendungsbereiche. Dies betrifft Anforderungen an die Herstellung wie auch den Einbau solcher Baustoffe. Mit

der Einführung dieser Verordnung soll eine bundesweite Vereinheitlichung hinsichtlich Ersatzbaustoffen geschaffen werden. Unter mineralische Ersatzbaustoffe fallen Recyclingbaustoffe aus Bau- und Abbruchabfällen, Aschen aus thermischen Prozessen und Schlacken aus der Erzeugung von Metallen. Die Herstellung dieser Stoffe beinhaltet Prozesse wie Trennen, Zerkleinern und Sortieren. Darüber hinaus soll die Ersatzbaustoffverordnung bezwecken, dass eine erhöhte Akzeptanz für die Verwendung von Ersatzbaustoffen geschaffen wird [17].

3.2 Relevante Untersuchungsparameter

In diesem Kapitel stehen die für eine Verwertung ausschlaggebenden Parameter und Störstoffe im Fokus. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf im Bauabfall enthaltenen Salzen. In Gegenwart von Feuchte lösen sich Salze und es erfolgt deren Freisetzung an Oberflächen, an denen eine Verdunstung der Feuchtigkeit stattfindet. Auf diese Weise kristallisieren Salze aus und treten zum Vorschein. Allerdings ist auch möglich, dass die Salze im Baustoffinneren auskristallisieren. Abplatzungen und Zerstörung von Beton oder Mauerwerk sind die Folgen [18, S.2].

3.2.1 Chlorid

Chloride (Cl^-) sind Verbindungen von Chlor und gehören zu den anorganischen Anionen. Sie stellen ein Säurerest-Ion und zugleich ein Salz der Salzsäure (HCl) dar und wirken darüber hinaus stark hygroskopisch, was eine Feuchtebindung aus der Umgebung bedeutet. Mit Chlor und Verbindungen von Chlor wird häufig so verfahren, dass deren Freisetzung als Abfallprodukte erfolgt. In Bodenumgebungen zeigt das Ion ein sehr mobiles Verhalten, da Chlorid an Mineralien nicht absorbiert wird. Aus diesem Grund bereitet sich ein Auswaschen als unproblematisch. Ferner gilt Chlor in gelöster Form als wassergefährdender Stoff. Diese Eigenschaft nimmt bei der Behandlung chlorhaltiger Bau- und Abbruchabfälle mittels Auswaschverfahren eine wesentliche Rolle ein. Es besteht darüber hinaus die Gefahr, dass Chlor und seine Verbindungen im Fall von nicht genügender Absicherung von Deponien entweichen können. Eine Chlorfreisetzung in die Umwelt entsteht zudem bei der Verbrennung derjenigen Stoffe,

die Chlor aufweisen [19]. Hinsichtlich des Siebsandes ist auf die Herkunft vorliegender Chloridverbindungen nicht zu schließen. Es ist lediglich bekannt, dass teils erhöhte Chloridmengen im Siebsand enthalten sind.

3.2.2 Sulfat

Sulfat (SO_4^{2-}) zählt wie auch Chlorid zu den anorganischen Anionen und ist ein Salz der Schwefelsäure (H_2SO_4). In der Natur kommt eine Vielzahl an Mineralien vor, für die Sulfat die Basis legt. Eines der für die Baustoffindustrie bedeutenden Sulfate stellt Calciumsulfat-Dihydrat dar. Die auch als Gips bekannte Verbindung ist in Wasser nur schwer löslich, wobei dieser Effekt mit steigender Temperatur verstärkt wird [20].

In den Kristallen von Gips befinden sich Wassermoleküle, die in dem Ionengitter des Salzes liegen. Beim Erhitzen resultiert eine Freisetzung des Kristallwassers, wodurch gebrannter Gips entsteht [21].

Ein Sulfat-Wert über 500 mg/L stellt für die Gesundheit für gewöhnlich keine Gefahr dar, jedoch kann Beton von sulfatreichem Wasser angegriffen werden [22, S.277].

Wie auch im Fall von Chlorid ist es möglich, dass Sulfat aus AbfalldPONEN für Bauschutt aufgrund von Sicherheitsmängeln hinsichtlich der Deponie austreten kann. Hauptsächliche Sulfatquellen stammen von gipshaltigem Material. Darunter fallen Anteile von Estrich, Rigips und Putz [23, S.5].

3.2.3 Leitfähigkeit

Unter dem Begriff „Leitfähigkeit“ wird die Fähigkeit eines Materials beziehungsweise eines Stoffes aufgefasst, Energie in Form von Elektrizität oder Wärme zu leiten. Die elektrische Leitfähigkeit ist hierbei von Bedeutung, da der Strom im Fall vorliegender Lösungen durch Ionen (Chlorid und Sulfat) transportiert wird. Angesichts der Tatsache, dass die Leitfähigkeit in hohem Maß temperaturabhängig ist, kann für mehrere Messwertermittlungen einer Probe bei verschiedenen Temperaturen kein Vergleich angestellt werden. Eine Referenztemperatur von 20 °C oder 25 °C gewährleistet daher

Messwerte bei konstant gehaltener Temperatur. Kennzeichnend für die Leitfähigkeitsmessung ist die Umrechnung der Leitfähigkeit bei schwankenden Temperaturbedingungen in denjenigen Leitfähigkeitswert, der bei konstanter Temperatur vorliegt [24, S.4]

Tabelle 1: Beispielhafte Leitfähigkeiten von verschiedenem Wasser [24, S.5]

	Leitfähigkeit bei 25°C
Reinstes Wasser	0,055 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Entionisiertes Wasser	1 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Regenwasser	50 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Trinkwasser	500 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Industrielles Abwasser	5 mS/cm
Meerwasser	50 mS/cm

Tabelle 1 macht deutlich, dass die Leitfähigkeit höhere Werte aufweist, je salzhaltiger die Zusammensetzung einer Lösung ist. Für Meerwasser beträgt die Leitfähigkeit 50 Milli-Siemens pro Zentimeter, was durch das Vorhandensein diverser Salze bedingt ist. Dabei nehmen Natrium von den Kationen und Chlorid auf der Seite der Anionen die größten Salzanteile ein [25].

3.2.4 TOC

Um ein Verständnis dafür zu erhalten, in welcher Weise sich organische Anteile im Abfall negativ auswirken, folgen Erklärungen zu diesen Zusammenhängen.

Der Summenparameter TOC steht für total organic carbon und entspricht der Gesamtheit an organisch gebundenem Kohlenstoff, der im Wasser enthalten ist. Dieser Parameter kennzeichnet die zu erwartenden Kohlenstoffverbindungen, welche mitunter in Bauabfällen vorkommen. Durch die Ermittlung des TOC-Werts wird somit die organische Belastung in Materialien festgestellt [26, S.4].

Der TOC spielt eine wesentliche Relevanz bei der Deponierung von Abfällen. Für die jeweiligen Deponieklassen sind folgende TOC-Grenzwerte in Massenprozent erlaubt:

Tabelle 2: Übersicht der massenanteiligen TOC-Grenzwerte für Deponieklassen gemäß DepV [27, S.2]

	DK 0	DK I	DK II	DK III
TOC	1 M.%	1 M.%	3 M.%	6 M.%

3.2.5 DOC

Der DOC (dissolved organic carbon) ist Teil des TOC und erfasst die gelösten organischen Kohlenstoffverbindungen in einer wässrigen Probe. Genauer genommen ist der durch Wasser mobilisierbare Anteil organischer Typs gemeint [1, S.410].

Bei der Einschätzung der Zulässigkeit von Abfallablagerungen gilt der Parameter DOC als ein bedeutendes Kriterium [28, Seite 13]. Darüber hinaus sind folgende Kriterien für die Zusammensetzung der organischen Anteile in Abfällen relevant [28, S.27]:

- Abfallursprung und –art
- Abfall(vor)behandlung
- Alter des Abfalls
- Bedingungen der Deponie

Für den DOC gibt es folgende Grenzwerte nach der DepV, zu denen Erläuterungen in Kapitel 7 gegeben werden.

Tabelle 3: Übersicht der DOC-Grenzwerte für Deponieklassen gemäß DepV [27, S.3]

	DK 0	DK I	DK II	DK III
DOC	50 mg/l	50 mg/l	80 mg/l	100 mg/l

3.3 Theorie der Aufbereitungsmethoden

Verfahren, bei denen das Recycling im Vordergrund steht, gliedern sich für gewöhnlich in mehrere Phasen. Dabei stellen mechanische Aufbereitungstechniken oftmals die erste Maßnahme dar. Die Abfolge beziehungsweise Aneinanderreihung mehrerer Verfahrensschritte wird durch Grundoperationen charakterisiert, wobei diese sich unterteilen lassen:

- **Ändern** für einen Korngrößenanstieg durch: Agglomerieren, Pelletieren
- **Ändern** für eine Korngrößenreduzierung durch: Zerkleinern, Brechen, Mahlen
- **Trennen** nach Korngröße: Klassieren
- **Trennen** nach Stofftyp: Sortieren
- **Trennen** nach Phasenart (fest - flüssig): Entwässern
- **Trennen** nach Phasenart (fest - gasförmig): Entstauben
- **Ordnen** nach Stoffzusammensetzung: Mischen, Vergleichmäßigen

Ein möglicher Zweck kann die gezielte Separierung unerwünschter Schad- und / oder Störstoffe mit anschließendem Austrag sein. Desweiteren kann auch eine Anreicherung recycelbarer Stoffe in Betracht gezogen werden [1, S.135-136].

Je nach Anforderungen und Verwendungszweck existieren also diverse Verfahren, mit denen die Möglichkeit besteht, eine Trennung von heterogenem Material beziehungsweise Aufgabegut durchzuführen, welches in mindestens einer Eigenschaft innerhalb der Zusammensetzung Unterschiede aufzeigt. Ein häufig vorkommendes und in Betracht gezogenes Kriterium ist die Partikelsinkgeschwindigkeit, die je nach Stoff oder Material variiert. Eine derartige Trennmethode erfolgt beispielsweise mithilfe eines Windsichters, auf den in Kapitel 4.1 näher eingegangen wird.

In diesem Kapitel wird auf die drei Verfahren Zerkleinern, Sichten und Sieben näher eingegangen.

3.3.1 Zerkleinerung

In der Aufbereitungstechnik charakterisiert das Zerkleinern einen bedeutenden Vorgang, bei dem Feststoffe unterschiedlicher Korngröße durch mechanische Krafteinwirkung zerlegt werden. Auf mikroskopischer Ebene bedeutet dies die Entstehung von sich ausbreitenden Rissen innerhalb des zu zerkleinernden Stoffes als Folge einer Überwindung der inneren Bindungskräfte. Durch einen Zerkleinerungsvorgang wird das Überführen von Aufgabematerial in feinere Körnungen bezweckt [1, S.138]. Im Fall von Siebsand bedeutet dies im übertragenen Sinn eine Zerkleinerung auf ein Kornspektrum von 0,063 mm bis 8 mm. Auf diese Intervallbreite wird in Kapitel 7 eingegangen.

Bei der Aufbereitung von Abfällen ist ein weites Spektrum von Materialmerkmalen zu berücksichtigen. Dementsprechend liegen je nach Abfallzusammensetzung harte wie auch weiche und / oder spröde, duktile oder im Fall von Gummianteilen auch elastische Materialien vor. Daher fällt eine Entscheidung anhand der geeigneten Beanspruchungsart. Folgende Beanspruchungen werden differenziert [1, S.139]:

- **Schlagbeanspruchung:** Ein bewegtes Werkzeug trifft das Material, wodurch es durch Schlag zerkleinert wird.
- **Prallbeanspruchung:** Das Material erfährt eine Beschleunigung und kollidiert mit einer feststehenden Fläche, was zu einer Zerkleinerung durch Aufprall führt.
- **Druckbeanspruchung:** Das Material wird zwischen zwei Werkzeugen durch Zusammendrücken zerkleinert.
- **Schneidbeanspruchung:** Das Material gelangt zwischen zwei gegenläufige Messer mit minimalem Spaltdurchmesser und wird durch Schneiden zerkleinert.
- **Reibbeanspruchung:** Zwei gegenläufige Flächen wirken auf das Material ein, wodurch dessen Zerkleinerung durch Reibeffekte erfolgt.
- **Reißende Beanspruchung:** Ein breiter Spalt trennt zwei Werkzeuge, die zueinander gegenläufig rotieren und das aufgegebene Material durch Reißen zerkleinern.

All diese Beanspruchungen bewirken auf ihre unterschiedliche Weise einen Bruch des Aufgabeguts. Insofern resultiert eine Materialzerkleinerung als Folge des Brechens von hartem und sprödem Ausgangsmaterial, wie es bei Bau- und Abbruchabfällen der

Fall ist. Bruchvorgänge werden dadurch erreicht, dass Spannungen durch Einwirkung von Beanspruchungen entstehen, die das Gefüge im Material lösen. Den Ausgangspunkt für solche Gefügeänderungen stellen vorhandene Inhomogenitäten im Feststoff dar, die einerseits eine Schwächung der Struktur bewirken und andererseits für lokale Spannungsüberhöhungen verantwortlich sind [29, S.65].



Abbildung 6: Bruchflächenverlauf und Simulation nach einem Aufprall einer Betonkugel [29, S.66]

Anhand der Abbildung 6 wird der schematische Bruchflächenverlauf einer Betonkugel verdeutlicht, nachdem diese einer Beanspruchung durch Prall ausgesetzt wurde. Auf der linken Seite ist ersichtlich, in welche Bruchbestandteile sich die Kugel aufteilt. Nach einem Aufprall zerfällt diese in vier Bereiche unterschiedlicher Größe und Struktur. Den größten Anteil nimmt der Restkegel ein, der sich erfahrungsgemäß auf der gegenüberliegenden Seite der Aufprallfläche befindet. An der Aufprallfläche bildet sich ein Feingutkegel aus, der die geringste Menge an feinem Bruchmaterial ausmacht. Angrenzend zu den beiden Kegeln entstehen Seitensplitter beziehungsweise längliche Bruchstücke, deren Größenbereich sich zwischen dem groben Restkegel und dem Feingutkegel einordnen lässt. Die rechte Darstellung stellt die Simulation des Kugelaufpralls dar. Auf dem mittleren und rechten Bild zeigen sich die entstehenden Riss- beziehungsweise Bruchverläufe.

Tabelle 4: Übersicht eingesetzter Zerkleinerungsmaschinen für definierte Zielkorngrößen [1, S.140]

Rohstoff/Materialeigenschaft Zielkorngröße	Grobzerkleinerung ca. < 150 mm	Mittelzerkleinerung ca. < 50 mm	Feinzerkleinerung ca. < 10 mm
Mineralien, Bauschutt hart bis mittelhart	Backenbrecher Prallbrecher Schlagwalzenbrecher	Schlagbrecher Prallbrecher	Stab-/Kugelmühle Feinprallmühle Stiftmühle Schlagkreuzmühle

In Tabelle 4 sind die für Bauschutt und Mineralien eingesetzten und geeigneten Maschinen für eine Zerkleinerung dargestellt. Da es sich hierbei um größtenteils hartes Material handelt, fällt die Wahl auf diejenigen Maschinen, die durch die Härte des Aufgabematerials nicht negativ beeinträchtigt werden. Für eine grobe beziehungsweise mittlere Zerkleinerung des aufgeführten Materials bis 150 Millimeter beziehungsweise 50 Millimeter kommen diverse Brecher in Frage. Um Korngrößen einer Feinheit kleiner 10 mm zu erzielen, werden Mühlen unterschiedlicher Art für einen Mahlprozess in Betracht gezogen.

3.3.2 Sichtung

Beim Sichtvorgang findet die Trennung von Partikeln nach deren Sinkgeschwindigkeit statt. Dabei wird Luft als Trennmedium eingesetzt. Beispielhaft wird das Funktionsprinzip einer Sichtung anhand des Anwendungsfalls eines Zickzacksichters erläutert, dessen Aufbau in Kapitel 4.1 beschrieben wird.

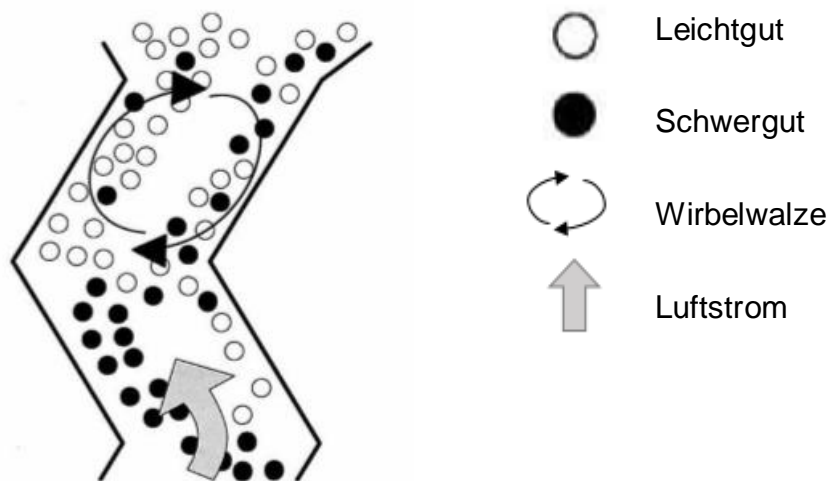


Abbildung 7: Wirkungsweise einer Querstromtrennung im Zick-Zack-Kanal [30]

Mithilfe der Abbildung 7 werden das Trennprinzip und die Strömungsverhältnisse innerhalb des Sichterkanals verdeutlicht. Im senkrechten Kanal strömt Luft von unten nach oben. Sobald das Aufgabegut dem Sortierprozess zugeführt wird und in den Sichterkanal gelangt, entsteht ein besonderer Effekt. Aufgrund der Gewichtskraft der Partikel, die mit der Schwerkraft fallen und dem entgegen der Schwerkraft wirkenden Luftstrom, der auf die Partikel trifft, bildet sich in jeder Stufe des Kanals eine Wirbelwalze aus. Wirbelwalzen verursachen eine Partikelbewegung, welche sich senkrecht zur strömenden Luft bewegt. Dabei werden leichte Partikel (weiß) abhängig von der Partikelgeometrie und deren Dichte mit dem Luftstrom aufwärts befördert, während schwere Partikel (schwarz) entlang der Kanalwand nach unten sinken. Auf diese Weise resultiert eine Auftrennung des Aufgabeguts in eine leichte und schwere Fraktion [30].

3.3.3 Siebung

Im Gegensatz zum Sichten liegt der Fokus bei einer Siebung in der Auftrennung von Partikeln hinsichtlich deren Größe, weshalb das Sieben als Größentrennung verstanden wird. Das Separieren fester Teilchenkollektive nach deren Geometrie und Struktur wird als Siebklassierung bezeichnet [29, S.89]. Für die Trennung eignen sich mitunter

Siebböden unterschiedlicher Öffnungsweiten. Zu diesem Thema werden in Kapitel 4.2 detaillierte Angaben gemacht.

Kennzeichnend für Siebvorgänge sind die Arten des Fördermediums. Während bei Sichtvorgängen lediglich Luft beziehungsweise gasförmige Medien zum Einsatz kommen, werden bei Siebprozessen zwei Arten differenziert. Einerseits gibt es Klassierverfahren, die ohne strömende Fluide auskommen und bei denen beispielsweise die Schwerkraft und/oder Vibrationseinflüsse ausschlaggebend sind. Auf der anderen Seite existieren Stromklassierer, die dadurch gekennzeichnet sind, dass Bestandteile eines Gemisches in derartigen Klassierern mithilfe eines Fluidstroms transportiert werden [1, S.151].

Siebprozesse finden Anwendung, wenn es einer gleichmäßigen oder einer Systematik zugrundeliegenden Aufteilung des Aufgabeguts bedarf. Daneben wird es für die gezielte Abtrennung von unerwünschten Stoffen definierter Größe und/oder Geometrie genutzt.

3.4 Konzepte zur Störstoffreduzierung

Dieses Kapitel stellt bewährte Verfahren und Prozesse vor, die es erlauben, vorliegende Störstoffanteile möglichst effizient und effektiv zu verringern. Die aufgeführten Konzepte zur Störstoffreduzierung beziehen sich auf Verfahren, die über die in dieser Ausarbeitung durchgeführten Versuche hinausgehen. Das bedeutet, es werden mögliche Ansätze zur Verringerung von Störstoffen in Betracht gezogen, die über das Potenzial verfügen, belasteten Siebsand nach gegebenen Möglichkeiten von den Störstoffen weitestgehend zu befreien.

Vor der eigentlichen Behandlung von Abfällen, deren Wiederverwendung durch das Vorhandensein von Störstoffen verhindert wird, sollte bereits vor dem Abbruch von Bauwerken eine zweckmäßige Herangehensweise angestrebt werden. Dieses Prinzip wird als selektiver Rückbau aufgefasst. Dabei findet ein Abbruch eines Bauwerks in umgekehrter Abfolge zu dessen Errichtung statt, sodass dadurch Material, von dem erhebliche Störstoffgehalte ausgehen, gezielt lokalisiert und entfernt werden kann. Auf

diese Weise kann einer Vermischung und damit der Verunreinigung anderer Materialien entgegengewirkt werden. Gips in unterschiedlichen Erscheinungsformen, wie Gipsplatten und Gipskarton, ist ein Beispiel für Bauteile auf Gipsbasis, die Quellen hoher Sulfatanteile darstellen [31, S.2].

Vor einem Abbruch kann mithilfe von Bausubstanzuntersuchungen das Ausmaß an Störstoffen in Bauwerken erfasst werden und eine Abgrenzung dieser Störstoffe von unbelastetem Material erfolgen [32].

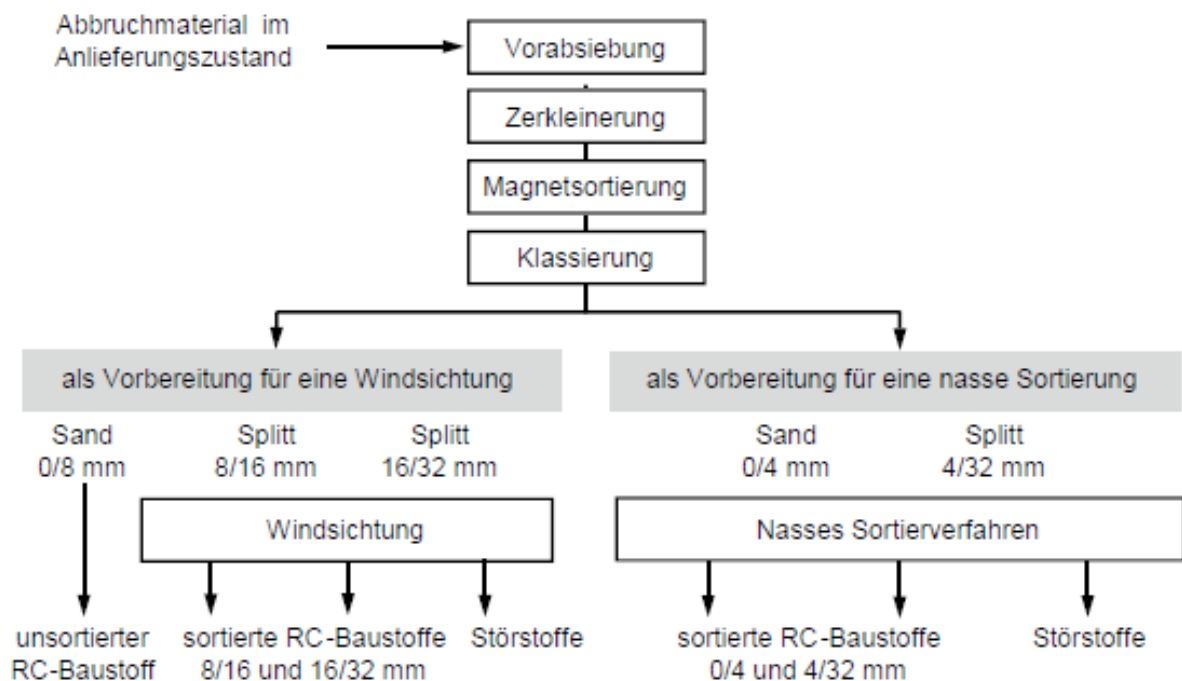


Abbildung 8: Beispielhafte Aufbereitungsabfolge belasteter Bauabfälle [29, S.106]

Ein mögliches Behandlungskonzept für Bauabfälle, die mit Störstoffen behaftet sind, wird in Abbildung 8 dargestellt. Angeliefertes Abbruchmaterial wird zunächst einer Vorabsiebung unterzogen und anschließend durch Brecheinwirkung zerkleinert. Um metallhaltige Anteile im Material zu identifizieren und auszuschleusen, wird eine Sortierung beispielsweise in der Ausführung eines Magnetabscheiders zwischengeschaltet. Nach einem Klassierprozess folgt eine Aufteilung des aufzubereitenden Stoffstroms in trockene und nasse Sortierverfahren. Für trockene Verfahren kann eine Windsichtung

in Betracht gezogen werden. Dabei kann Sand (als Siebsand zu betrachten) der Korngröße 0 bis 8 Millimeter als unsortierter Recyclingbaustoff eingestuft werden. Material größerer Zusammensetzung von 8 bis 16 Millimeter bzw. 16 bis 32 Millimeter, gemäß Abbildung als Splitt deklariert, durchläuft eine Windsichtung. Auf diese Weise resultiert dadurch eine Störstoffseparierung und sortierter Recyclingbaustoff derselben Größenverteilung, wie bei Zufuhr in den Windsichter. Zu Trockenprozessen können alternativ nasse Methoden eingesetzt werden.

Zunächst wird das Ausmaß an Störstoffen mit bewährten Analysemethoden ermittelt. Auf die geeigneten Methoden wird in den Kapiteln 4.4 und 4.5 eingegangen. Je nachdem, wie hoch die Anteile an Störstoffen beziehungsweise Störparametern sind, wird das passende und am ehesten in Frage kommende Verfahren zur Verringerung der aufgeführten Störstoffe in Betracht gezogen.

Neben den in Kapitel 3.3 beschriebenen Aufbereitungsverfahren, die in gewisser Weise zu einer Störstoffverminderung beitragen, gibt es eine Reihe weiterer Methoden, die primär auf die Herabsetzung von Störstoffen ausgelegt und konzipiert sind. Diese Prozessanwendungen werden nachfolgend beschrieben.

Neben trockenen Aufbereitungsverfahren gibt es nasse Verfahren, die durch Waschvorgänge charakterisiert sind. Hierzu zählen diverse Abscheider wie auch Zyklone in verschiedenen Ausführungen.

All diese Apparaturen haben ein Prinzip gemeinsam. Angesichts der Tatsache, dass im Gemenge befindliche Mineralien aufgrund des gegenüber Verunreinigungen (Organik und Störstoffe) größeren Gewichts im Wasser absinken, wird dies bei der Nassaufbereitung genutzt. Insofern ergibt sich für schwere Anteile eine Sedimentation, während der Großteil an Verunreinigungen im Wasser aufsteigt. Düsen können optional zum Einsatz kommen, die für Turbulenzen im Wasserbad sorgen und somit den Trenneffekt verstärken [33].

Es wird zwischen dem Schwimm-Sink-Verfahren und der Trennung im Zentrifugalfeld unterschieden, wobei beide Methoden gewissen Abwandlungen unterliegen. Kennzeichnend für das Schwimm-Sink-Verfahren ist ein Wasserbad, in dem die Trennung stattfindet. Leichtstoff- und Schrägradabscheider in verschiedenen Bauausführungen

eignen sich, um das Prinzip der Schwimm-Sink-Methode technisch umzusetzen. Der Austrag von Leicht- und Schwergut wird dabei durch Förderschnecken und -bänder realisiert [29, S.111].

Eine Sonderform stellt der Hydrobandabscheider dar, der auf dem Verfahren der Filmschichtsortierung beruht. Dabei trennt sich das Aufgabegut folgendermaßen: Über Düsen gelangt Washwasser auf ein Transportband, dessen Förderrichtung der des strömenden Wassers entgegengesetzt ist. Auf diese Weise wird erzielt, dass die leichten Bestandteile mit dem Washwasser mitgeführt werden, während schwere Bestandteile aufgrund ihrer größeren Reibungskräfte auf dem Transportband haften bleiben. Dementsprechend entsteht eine Auftrennung in Leicht- und Schwergut [29, S.115].

Für die Trennung im Zentrifugalfeld stehen vorrangig Zyklone und Zentrifugen in diversen Varianten zur Auswahl. Im Gegensatz zu den Apparaten für die Schwimm-Sink-Verfahren weisen auf die Zentrifugalkraft basierte Apparate geringere Absetzzeiten auf. Darüber hinaus sind ein verhältnismäßig geringer Platzbedarf und geringe Wassermenge erforderlich. Die Funktionsweise eines Hydrozyklons wird nachfolgend näher erläutert.

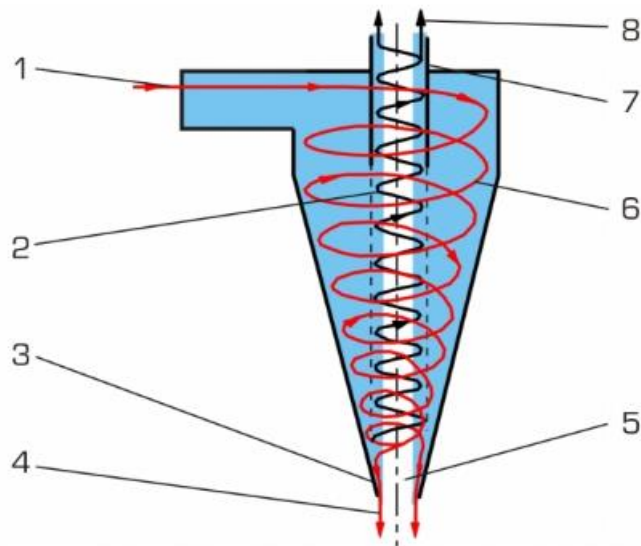


Abbildung 9: Aufbau und Funktionsweise eines Hydrozyklons [34]

In Abbildung 9 wird eine Suspension aus Wasser und zerkleinerten Bauabfällen in den Zulauf (1) gegeben. Ein Zentrifugalfeld entsteht aufgrund der unter Druck stattfindenden und tangential gerichteten Einschleusung. Dadurch, dass sich der Zyklon nach unten hin verjüngt, resultiert eine abwärts gerichtete Spiralbewegung, die als Primärwirbel (6) bezeichnet wird. Schwere Bestandteile werden radial in Richtung Zyklonwand getragen, wohingegen Bestandteile, die leichter als das Wasser sind, sich vermehrt im Zentrum des Zyklons anhäufen. Der Unterlauf (4) fungiert durch seine Ausführung als Drossel, damit verhindert wird, dass nicht die gesamte Suspension aus dem Zyklon fließt. Die schweren Bestandteile treten mittels einer Apexdüse (3) im Unterlauf aus und die restliche von Grobmaterial befreite Suspension wird oberhalb des unteren Auslaufs zur Umkehr gezwungen. Dabei bildet sich ein innerer, im Luftkern (5) befindlicher Sekundärwirbel (2), der sich aufwärts bewegt. Das Leichtgut verlässt den Zyklon über das Tauchrohr (7) und tritt durch den Oberlauf (8) aus [1, S.171].

Nassaufbereitungsverfahren bieten den Vorteil, dass neben der Störstoffbeseitigung mittels Waschen eine verglichen mit trockenen Aufbereitungsverfahren eine relativ geringe Staubentwicklung entsteht [35, S.74].

Darüber hinaus ist die Durchsatzrate wie auch die Trennschärfe höher [36, S.36]. Jedoch gibt es den Nachteil, dass entstehende Abwassermengen nach dem Waschvorgang regelkonform zu reinigen sind. Für die Behandlung des Abwassers stehen mehrere Anwendungen zur Verfügung.

Darunter fallen folgende Behandlungsarten:

- Mechanische Behandlung [37, S. 5] durch: Sedimentation, Flotation, Filtration
- Physikalisch-chemische Behandlung [37, S.17] durch: Adsorption, Umkehrosmose, Ionenaustausch, Fällung, Flockung, Oxidation

Die aufgeführten Verfahren werden nicht näher erläutert, da es sich um die Abwasserbehandlung handelt, die für den Fokus dieser Arbeit nicht an erster Stelle steht.

3.5 Einsatzmöglichkeiten von recyceltem Siebsand

Nach dem Abbruch von Bauwerken werden durch verschiedene Aufbereitungstechniken die unterschiedlichen Korngrößen je nach Verwendungszweck und Materialanforderung erzeugt. Werden die gestellten Anforderungen erfüllt und weisen die aufbereiteten Sekundärbaustoffe (rezyklierte Gesteinskörnungen) vergleichbare Eigenschaften von Primärbaustoffen auf, kann eine Verwendung von Sekundärbaustoffen in Bauvorhaben erfolgen. Primärroh- bzw. -baustoffe gelten als Stoffe natürlicher Herkunft.

Für Siebsand existiert eine Reihe von Einsatzmöglichkeiten, die in Abbildung 10 veranschaulicht werden.

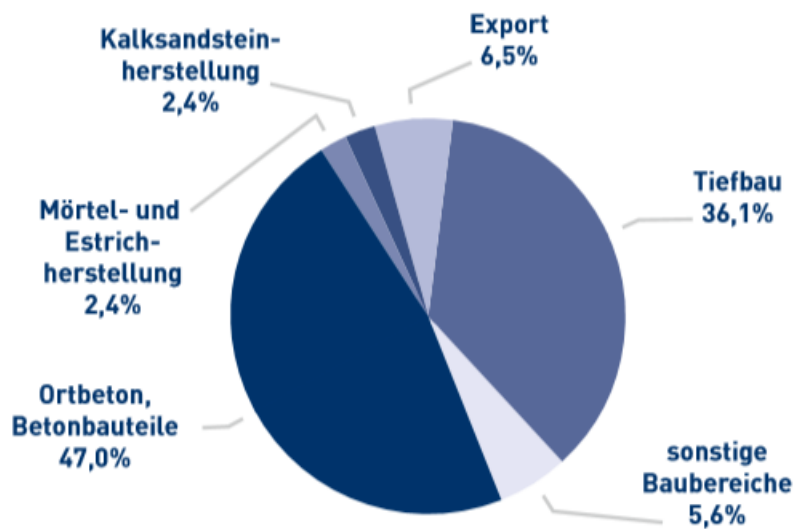


Abbildung 10: Verwertungswege für Sand (2016) [38, S.26]

Gemäß der Abbildung 10 wird im Jahr 2016 etwa die Hälfte (47 Prozent) des verfügbaren Sandes für die Herstellung von Betonbauteilen genutzt. Mit 36,1 Prozent und damit einem guten Drittel findet Sand im Tiefbau Anwendung, wie beispielsweise für Tragschichten sowie Schichten zum Zweck einer Drainage oder dem Schutz gegen

Frosteinwirkung. [38, S.26]. Lediglich 4,8 Prozent werden für die Herstellung von Mörtel, Estrich und Kalksandstein vorgesehen. Die restlichen 12,1 Prozent verteilen sich auf den Export von Sand wie auch dessen Einsatz in weiteren Baubereichen.

Mineralischer Baustoff	Produkte
Ungebunden	
Naturwerksteine, Natursteine, Kies, Sand	Dammbau, Gleisschotter, Frostschutzschichten, Tragschichten im Straßenbau, Fassadenplatten aus Naturstein
Hydraulisch gebunden	
Beton	Stahlbetontragelemente und -decken, Betonfahrbahnen, Betonsteine, Porenbeton, Betondachsteine, Zementestriche
Mörtel	Mauerwerkbinder, Putzschichten
Kalksandstein	Mauersteine, Platten
Gips	Gipskartonplatten, Gipsputz

Abbildung 11: Übersicht mineralischer Baustoffe und deren Verwendung [39, S.356]

In Abbildung 11 wird eine Auflistung mineralischer Baustoffe in ungebundener wie auch gebundener Form dargestellt. Außerdem sind für beide Arten von Baustoffen die Verwendungsmöglichkeiten dargestellt.

Ausgehend von ungebundenem Sand lassen sich wiederum hydraulisch gebundene Baustoffe herstellen. Insofern ist das Einsatzspektrum für aufbereiteten Siebsand groß, zumal Beton, Mörtel, etc. auf Sand basieren. Siebsand kann als Zuschlagmaterial für Zement und Beton Verwendung finden.

Hinsichtlich der organischen Anteile (mitunter Holz, Kunststoff, Papier) im Bauabfall können diese für eine energetische Verwertung in Frage kommen, da diese hochkalorische Abfallart der heizwertreichen Fraktion zuzuordnen ist und als Ersatzbrennstoff eingestuft werden kann [40, S.13].

Diverse Kraftwerke, die Zementindustrie wie auch andere Industriebetriebe mit hohem Wärme- oder Dampfbedarf stellen die Hauptabnehmer von Ersatzbrennstoffen dar [39, S.502].

4 Messapparaturen und Gerätschaften

In diesem Kapitel werden sämtliche apparative Utensilien erläutert, die für die Versuchsdurchführungen zum Einsatz gekommen sind. Darunter fallen fünf Komponenten, auf die im Folgenden eingegangen wird.

4.1 Zickzacksichter

Der Zickzacksichter gehört in die Kategorie der Windsichter. Bei diesem Sichtprinzip erfolgt die Sortierung der Partikel anhand der Dichteunterschiede, wobei Luft als Fördermedium dient.

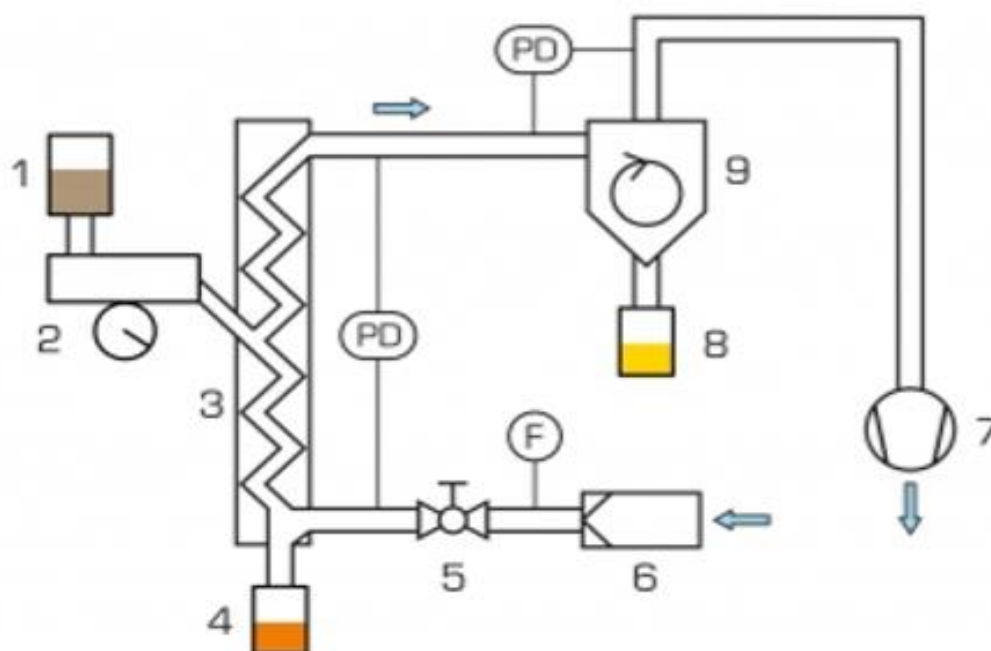


Abbildung 12: Schema des Aufbaus eines Zick-Zack-Sichters [41]

Das Funktionsprinzip sowie der Aufbau eines Zick-Zack-Sichters werden in Abbildung 12 dargestellt. Über einen Füllbehälter (1) wird das Aufgabegut in den Prozess gegeben. Unterhalb des Behälters befindet sich eine nach Bedarf der Vibrationsintensität einstellbare Vibrationsrinne (2), in die das zu trennende Gemisch gelangt. Durch die Vibration wird das Aufgabegut allmählich in den Sichterkanal (3) befördert. Innerhalb des senkrechten Kanals bewegt sich ein durch ein Gebläse (7) erzeugter Luftvolumenstrom aufwärts. Ein Filter (6) verhindert, dass ungewünschte Fremdkörper in den Sichtprozess gelangen. Die Gebläseleistung ist über ein Ventil (5) stufenverstellbar. Auf diese Weise sinkt Material aufgrund der Schwerkraft abwärts und wird in einem Auffanggefäß für Grobgut (4) gesammelt. Der leichte Materialanteil beziehungsweise derjenige, der eine verhältnismäßig geringe Dichte aufweist, wird durch die aufwärts strömende Luft mitgerissen und gelangt in einen Zyklon (9), wo der Feinanteil abgeschieden und anschließend in dem Behälter für das Feingut (8) aufgefangen wird. Mittels Druckmesspunkten lässt sich optional der Druckverlust bestimmen. Diese Möglichkeit ist jedoch nicht bei jedem Windsichtermodell verfügbar [41].

4.2 Siebturm

Der Siebapparat (Abbildung 13) setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Im Fundament (1) befinden sich die Steuereinheit mit Bedienelementen und der Antrieb, der für die nötige horizontal gerichtete Vibrationsschwingung sorgt. Ferner ist über das Panel die Siebdauer einstellbar. Siebböden (2) unterschiedlicher Feinheit der Öffnungen werden aufeinander gestapelt, wobei der Lochdurchmesser der Böden mit zunehmender Höhe der Stapelung steigt. Dementsprechend weisen die untersten Siebböden auch das feinste abgeseibte Material auf. Dabei umfasst der Siebdurchmesser Bereiche von wenigen Mikrometern bis hin zu mehreren Zentimetern. Die Siebböden werden auf der Vibrationsfläche zwischen zwei Befestigungsstäben (3) positioniert. Anschließend wird eine Abdeckung (4), die über die Stäbe gesteckt wird, auf den obersten Siebboden gelegt. Damit aufgegebenes Material während des Siebvorgangs nicht verloren geht und die Stapelung der Siebböden nicht verrutscht oder fällt, kommen Schnellspanner (5) zum Einsatz, die über beide Stäbe gesteckt werden und somit den Deckel abdichten wie auch die Siebböden fixieren.



Abbildung 13: Siebturm der Firma Retsch [42]

4.3 Ionenchromatograph

Die Wirkungsweise eines Ionenchromatographs (IC) wird nachfolgend beschrieben. Anhand des Typs ICS-1100 von Dionex wird auf die wesentlichen Komponenten eingegangen. Mit einem IC wird eine Analyse von Ionen mithilfe der Leitfähigkeitsermittlung bezweckt. Genauer genommen erfolgt eine Bestimmung gelöster Anionen. Der Prozess beruht auf einer Trennmethode physikalisch-chemischer Art, bei der eine Stoffverteilung zwischen einer festen stationären und einer flüssigen mobilen Phase stattfindet [43, S.7].

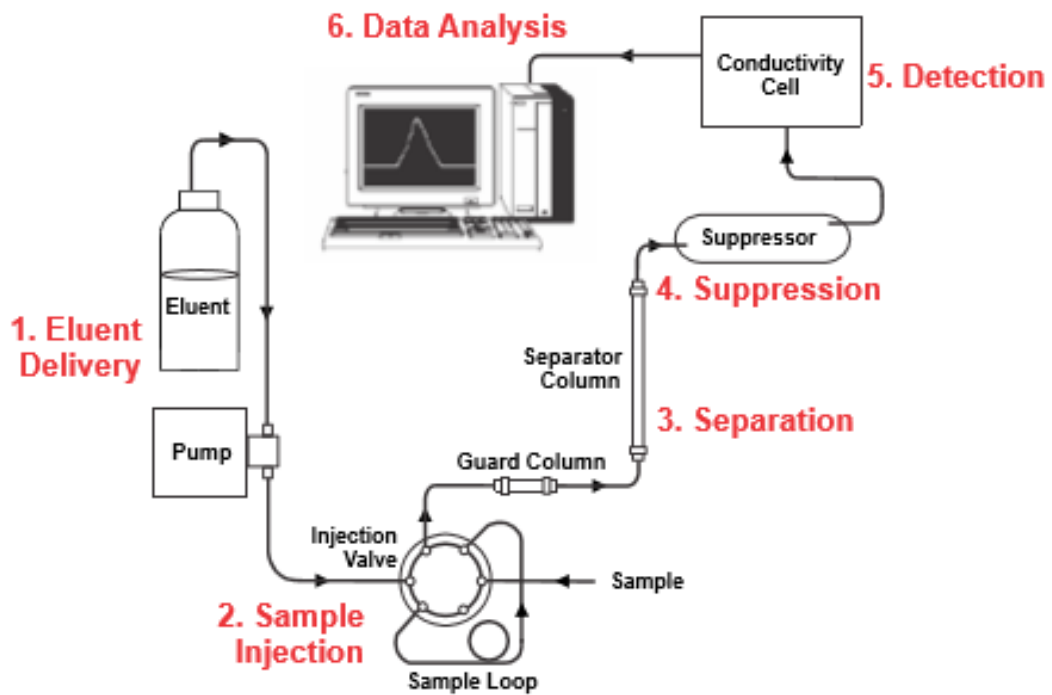


Abbildung 14: Prozessschritte für die Ionenanalyse [44, S.2]

In Abbildung 14 ist ein Überblick des IC-Verfahrens dargestellt, das aus sechs Teilschritten besteht [44, S.2-3]:

1. Bereitstellung des Eluenten

Das Auftrennen der Ionen erfolgt mithilfe des Eluens, einer Flüssigkeit, die für den Transport der Probe (Sample) durch das IC-System dient. Die Konzentration des Eluenten wie auch dessen Zusammensetzung erfahren dabei keine schwankenden Veränderungen.

2. Injizieren der Probe

In diesem Schritt gelangt die flüssige Probe in die Probenschleife (Sample Loop). Durch ein Pumpensystem wird die Probe wie auch das Eluens durch die Vorsäule (Guard Column) befördert. Die Vorsäule hält Bestandteile zurück und verhindert somit eine Verschmutzung der nachgeschalteten Trennsäule (Separator Column).

3. Trennung

Die Aufspaltung der sich in den Proben befindlichen Ionen geschieht während des Transports von Probe und Eluens durch die Trennsäule. Letztendlich findet ein Austausch von Ionen durch dieses Trennprinzip statt. Je nach Probe durchqueren die Ionen die Trennsäule mit verschiedenen Geschwindigkeiten. Dementsprechend versetzt zueinander liegen die Ionenkonzentrationen der Proben beziehungsweise Salze bei der späteren Darstellung.

4. Suppression

Nachdem die Probe-Ionen und das Eluens die Trennsäule passiert haben, schließt sich im nächsten Schritt ein Unterdrücker (Suppressor) an. Sein Zweck liegt in der selektiven Verbesserung der Detektion von zu untersuchenden Proben, was durch eine Absenkung der Leitfähigkeit des Eluenten erreicht wird.

5. Detektion

Bei der Detektion liefert eine Leitfähigkeitsmesszelle (Conductivity Cell) den elektrischen Leitwert der Probe-Ionen und ruft ein Signal hervor, das sich auf ein physikalisches oder chemisches Merkmal des Analyt-Ions stützt.

6. Analyse der Daten

Sobald der elektrische Leitwert erfasst wurde, wird das hervorgerufene Signal an das Datenauswertungssystem geleitet. Anhand der unterschiedlichen Retentionszeiten der Ionen werden deren Probenverläufe mit den Verläufen verglichen, die von einer Standardlösung stammen. Auf die Standardlösung, die als Referenz fungiert, wird in Kapitel 6.3 eingegangen. Ein Chromatogramm stellt die Konzentrationen der untersuchten Substanzen dar.

4.4 Primacs / Formacs Analyzer

Die Analysegeräte der Reihe Primacs beziehungsweise Formacs erlauben die präzise Erfassung des Parameters TOC.

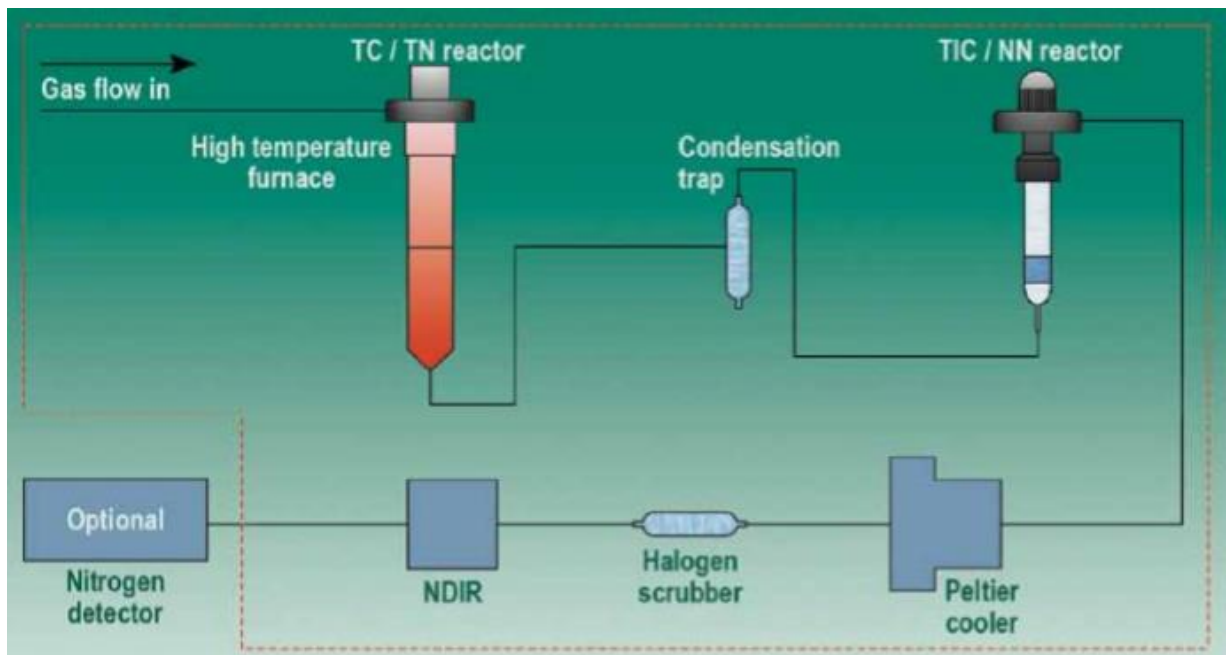


Abbildung 15: Wirkungsweise für die Ermittlung des TOC-Wertes [45, S.3]

Abbildung 15 gibt einen Überblick des Verfahrens, mit dem eine TOC-Bestimmung ermöglicht wird. Der TOC resultiert aus der Differenz (Gesamter Kohlenstoff) TC - (Gesamter anorganischer Kohlenstoff) TIC. Dabei werden TC wie auch TIC separat ermittelt. Ersterer resultiert aus dem Einblasen der Probe in einen Hochtemperatur-Verbrennungsofen, in dem der TC bei Temperaturen von 950 °C katalytisch oxidiert und dadurch eine Umwandlung in Kohlenstoffdioxid CO_2 erfolgt, das wiederum in ein Trägergas (Gas flow in) dispergiert. Das Trägergas (bspw. Sauerstoff oder Helium) dient dem Transport des CO_2 durch den Prozess. Die Gasmischung gelangt in einen Wäscher aus Stahlwolle (condensation trap), um Säuredämpfe auszuschließen, die das Messergebnis beeinträchtigen würden. Es folgt eine Messung der CO_2 -Konzentration unter Verwendung eines nichtdispersiven Infrarotdetektors (NDIR). Der TIC ergibt sich durch die Probeninjizierung in einen säurehaltigen Reaktor (TIC / NN reactor). In diesem Schritt wird anorganischer Kohlenstoff in CO_2 umgesetzt. Bevor die CO_2 -Messung stattfindet, sorgt ein Peltierkühler für die Entfernung vorhandener Feuchte in der Gasmischung. An den Peltierkühler schließt sich ein Wäscher (halogen scrubber) an, der Halogene abfängt. Wie bei dem TC wird in gleicher Weise im Fall von TIC die entstehende Konzentration an CO_2 - hervorgerufen durch die Versauerung - mithilfe des

NDIR erfasst. Optional wird neben der Messung von Kohlendioxid auch eine Bestimmung der Stickstoffkonzentration (Nitrogen detector) ermöglicht [45, S.3].

5 Stand der Technik

Das Recycling von Material erlangt seit den fortschreitenden Engpässen hinsichtlich verfügbarer Rohstoffe wie auch begrenztem Deponieraum immer mehr an Bedeutung. Daraus geht der kontinuierliche Fortschritt von Aufbereitungstechniken hervor, damit diese den bestehenden Anforderungen gerecht werden und möglichst entsprechen. Jene Anforderungen drücken sich beispielsweise durch komplexe und inhomogene Abfallzusammensetzungen aus [1, S.135].

Das Fraunhofer Institut für Bauphysik hat ein Verfahren im Labormaßstab entwickelt, das die Beseitigung von Sulfat aus Bauschutt ermöglicht. Im Rahmen des Projekts „ENSUBA“ gelang es den Wissenschaftlern, den Großteil an Sulfat im Labormaßstab zu entfernen. Dabei basiert die Methode auf einer Austauschreaktion zwischen Ammoniumcarbonat und Gips. In einem ersten Schritt erfolgt eine Gipssubstitution durch Calcit (Calciumcarbonat). Das entstehende Ammoniumsulfat wird aus der flüssigen Phase abgetrennt und bewirkt in Gegenwart von Calcit eine Ausfällung als reiner Gips.

Für die Untersuchung der Ausgangsstoffe wurden Röntgenfluoreszenz- und Pulverröntgenbeugungsanalysen genutzt. Letztlich resultierten folgende Erkenntnisse: Untersuchte Mörtelproben wiesen lediglich 0,8 bis 1,4 Gewichtsprozent an Sulfat auf, während es bei Porenbeton mit 0,5 bis 1 Gewichtsprozent noch geringer ausfiel. Darüber hinaus war es durch die Umkristallisation aus der flüssigen Phase möglich, große Anteile an Gips (75 - 87 %, je nach Baustoff) zurückzugewinnen. Ob sich dieses Verfahren auf den Großmaßstab übertragen kann und etabliert, steht noch außer Frage [46].

Davon abgesehen existiert ein weiteres Projekt namens „BauCycle“, das ebenfalls von dem Fraunhofer Institut stammt. Dabei durchläuft anfallendes Feinmaterial mineralischer Zusammensetzung zunächst eine opto-pneumatische Sortiermethode, die es ermöglicht, eine selektive Trennung nach Farbe und Helligkeit des Materials vorzunehmen. Darüber hinaus können damit chemische Eigenschaften wie beispielsweise „silikatisch“ oder „sulfatisch“ identifiziert werden und eine Trennung nach diesen Ei-

genschaften erfolgen. Mithilfe einer filterbasierten Infrarotkamera werden die Feinfraktionen erfasst und durch Düsen mittels Luftdruckstößen in verschiedene Behälter befördert. Dieser Ansatz ermöglicht einen stündlichen Materialdurchsatz von 1,5 Tonnen [47].

6 Experimenteller Teil

In diesem Kapitel werden die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchsvorgehensweisen vorgestellt. Damit wird bezweckt, dass Erkenntnisse bezüglich des untersuchten Materials und dessen Störstoffbelastung gewonnen und herausgefunden werden kann, inwieweit und in welchem Ausmaß Material belastet und dementsprechend behandelt werden kann. Dabei steht der Korngrößenbereich zwischen 0 und 5,6 Millimeter sowie 5,6 und 8 Millimeter im Fokus, da diese Bereiche den Siebsand betreffen bzw. Siebsand dieses Größenspektrum einnimmt. Material, das größer als 8 Millimeter ist, enthält zum Großteil organisches wie auch mineralisches Grobmaterial, das nicht als Siebsand deklariert wird. Insgesamt wurden jeweils fünf Proben der Größe 0 bis 5,6 Millimeter und 5,6 bis 8 Millimeter innerhalb eines Monats untersucht. Dabei fanden alle Probenahmen aus verschiedenen Bereichen einer Halde statt, um ein möglichst repräsentatives Resultat zu erzielen.

6.1 Erkenntnisse aus Vorversuchen

Nach mehreren Durchläufen im Zickzacksichter konnte der Großteil des aufgegebenen Materials von groben und unförmigen Bestandteilen (bspw. längliche Holzspäne) separiert werden. Anschließend wurden Siebversuche für Korngrößendurchmesser von Bestandteilen der Größen 0,063 Millimeter bis 20 Millimeter durchgeführt, um repräsentative Korngrößenverteilungen zu erhalten und auf diese Weise eine ungefähre Tendenz zu schaffen, innerhalb welchen Größenbereiches sich der größte Teil der Partikel und damit potentielle Störstoffansammlungen befinden. Die Siebung wird mithilfe eines vertikal angeordneten Siebturms durchgeführt und erfolgt unter selbst gewählten Bedingungen. Dabei handelt es sich um die Parameter Volumenstrom und Vibrationsintensität.

Tabelle 5: Windsichten

Aufgabegut [g]	Volumenstrom [m ³ /h]	Vibrations- stufe	Grobgut [g]	Feingut [g]	Verlust [g]
1000	30	5	352,9	633,2	13,9
100 (aus 633,2)	5	5	82	16,4	1,6
200	15	5	121	78,2	0,8
200	50	5	12,9	186,2	0,9
200	15	8	106,9	87,8	5,3
200	5	5	167,6	24,3	8,1

Je nach Volumenstrom wird ein bestimmtes Verhältnis von Grob- zu Feingut erzielt. So bewirkt ein hoher Volumenstrom (50 m³/h), dass deutlich mehr Fein- als Grobgut vorliegt, zumal nur die schwersten Partikel bzw. die mit der höchsten Dichte nach oben befördert werden. Niedrige Volumenströme (5 m³/h) bewirken dementsprechend das Gegenteil. Folglich überwiegt der Feingutanteil der Menge an Grobgut. Allerdings wird bereits fein vorliegendes Aufgabegut selbst bei kleinen Volumenströmen (5m³/h) in dem Sichtkanal aufwärts befördert, da die Partikel ein vernachlässigbar geringes Gewicht aufweisen und dadurch der Großteil als grob und der Rest als fein eingestuft wird (82 g zu 16,4 g).

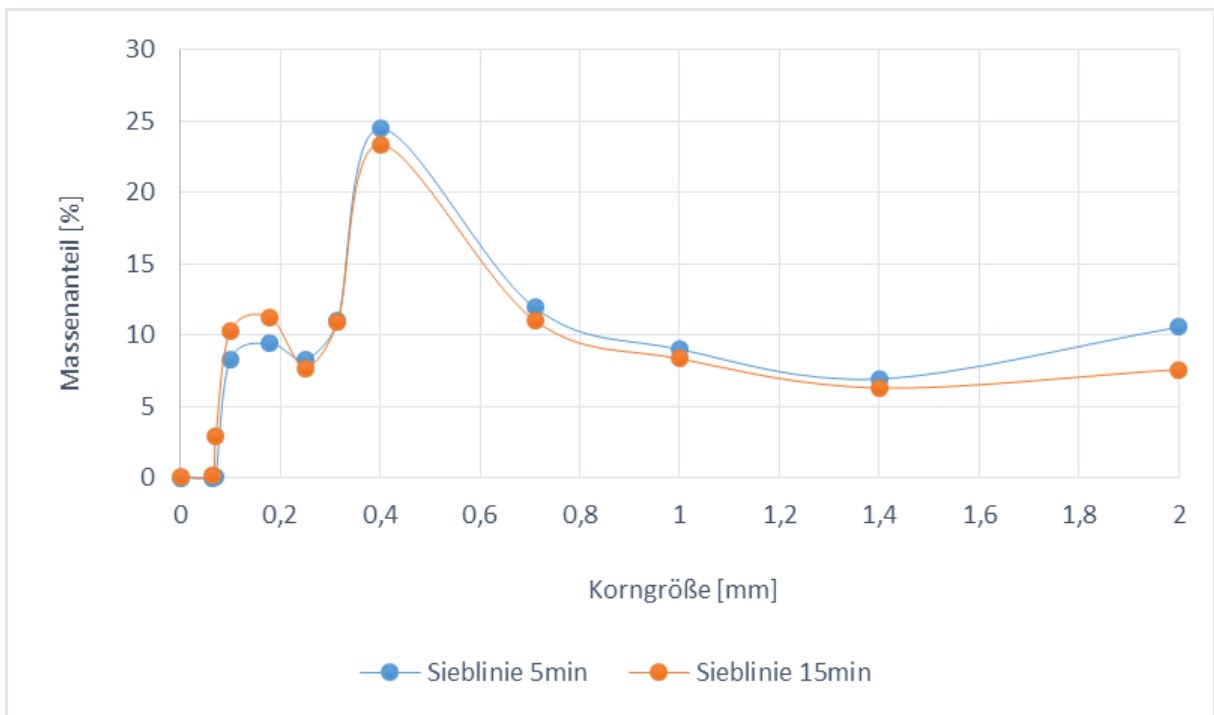


Abbildung 16: Prozentuale Massenverteilung der Korngröße 0,063 - 2 mm bei verschiedener Siebdauer

In Abbildung 16 sind die massenbezogenen Verläufe nach 5 und 15 minütigen Siebdurchführungen zu sehen. 100 g wurden jeweils für beide Siebungen verwendet, da die Kapazität des verwendeten Siebturms der Firma Retsch keine größeren Mengen für einen ununterbrochenen Siebdurchlauf zulässt. Die Verläufe beider Siebungen zeigen jeweils einen Peak bei etwa 25 Massenprozent. Ein Viertel des gesiebten Materials entspricht einer Korngröße von 0,4 Millimeter. Das restliche Kornspektrum liegt sowohl für eine Siebdauer von 5 Minuten als auch von 15 Minuten zwischen 6 und 12 Massenprozent (siehe untere Tabelle 6). Lediglich Korngrößen unter 1 Millimeter bilden mit Massenanteilen kleiner 5 Prozent die Ausnahme. Anhand beider Kurvenverläufe lässt sich schlussfolgern, dass die Siebdauer keinen entscheidenden Einfluss auf die Korngrößenverteilung nimmt.

Tabelle 6: Übersicht der Massenanteile nach Siebdauern von 5 und 15 Minuten

	5 min	15 min
Maschenweite Sieb	Massenanteil	Massenanteil
[mm]	[%]	[%]
Boden	0	0,107
0,063	0	0,214
0,071	0,104	2,891
0,1	8,290	10,278
0,18	9,430	11,242
0,25	8,290	7,709
0,315	10,985	10,921
0,4	24,456	23,341
0,71	11,917	11,028
1	9,016	8,351
1,4	6,943	6,317
2	10,570	7,602

6.2 Mechanische Vorgehensweise

Bei der mechanischen Vorgehensweise wird anfallender Bauabfall grober Zusammensetzung in einem ersten Schritt einer Zerkleinerung unterzogen. Dafür kommen für Bauabfall, der auch mineralische Bauschuttkomponenten beinhaltet, Brech- und Mahlanlagen zum Einsatz. Aufgrund der Tatsache, dass bei den Versuchsdurchführungen jeweils fünf Chargen für Feinanteile zwischen 0 und 5,6 Millimeter sowie für Material zwischen 5,6 und 8 Millimeter angestrebt wurden, wird der Bauabfall dementsprechend auf die angegebenen Korngrößen zerkleinert. Hartes und grobes Material, wie etwa Ziegel und Mauerwerk werden in Brechern zerkleinert, bevor Mühlapparate jeglicher Art verwendet werden. Andernfalls würden Mühlapparate, die nicht für sehr hartes Material ausgelegt sind, Schäden nehmen. Gemäß Tabelle 4 in Kapitel 3.3.1 eignen sich für diesen Fall Mahlvorgänge, die das Grobgut des Bauabfalls auf unter 10

Millimeter bringen. Nach der erfolgten Zerkleinerung schließt sich ein Siebprozess an, der mithilfe eines Siebturms realisiert wurde. Demzufolge wurden Siebböden mit Lochweiten von 5,6 und 8 Millimeter Öffnung genutzt, um das Aufgabegut in zwei Fraktionen aufzutrennen. Diese Prozessschritte wurden wiederholt für fünf Probebeziehungen aus derselben Halde durchlaufen, um eine Referenz zu gewährleisten und Vergleiche zu ziehen. Optional lässt sich eine Sichtung in den Prozess integrieren, um eine Dichtentrennung des aufgegebenen Bauabfalls durchzuführen.

Die Abbildungen 17 bis 19 zeigen beispielhaft die Zusammensetzung der ersten Probe für 0 - 5,6 und 5,6 - 8 Millimeter. Die restlichen Proben ähneln sich in deren Zusammensetzung, weshalb Probe 1 als Referenz für alle Proben genommen wird.



Abbildung 17: Fein- und Grobfraktion der Probe 1



Abbildung 18: Draufsicht Feinfraktion 0-5,6 mm



Abbildung 19: Draufsicht Grobfraktion 5,6-8 mm

6.3 Analytische Vorgehensweise

Für die Bestimmung der gelösten Anionen Sulfat und Chlorid ist folgendes Vorgehen maßgebend:

Der Ionenchromatograph wird in einem ersten Schritt mithilfe von Standardlösungen kalibriert. Die Standardlösungen für Chlorid und Sulfat entstehen unter Zugabe von Reinstwasser in den abgestuften Konzentrationen: 50 mg/l, 25 mg/l, 10 mg/l, 2,5 mg/l, 1 mg/l. Anschließend folgt das Ansetzen der Stammlösung, für die 16,8 g Natriumhydrogencarbonat sowie 67,8 g Natriumcarbonat in einem Liter Reinstwasser gelöst werden. Für den Eluenten sind 5 ml der hergestellten Stammlösung zu entnehmen und mit Reinstwasser auf einen Liter aufzufüllen. Hiernach schließt sich ein Ultraschallbad an, in dem sich der Eluent eine Stunde befindet. Ein Membranfilter mit einer Porenweite von 0,45 µm wird eingesetzt, um eine Filtration der Proben durchzuführen [siehe Anhang]. Anhand des Vergleichs der von den Proben ausgehenden Daten mit den Daten, die von der Standardlösung stammen, ist es möglich, eine Identifizierung der Proben-Ionen vorzunehmen. Auf diese Weise wird ein Chromatogramm erstellt, in dem die Konzentration der erfassten gelösten Anionen angezeigt wird [44, S.1].

7 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die anhand der Versuchsdurchführungen erzielten Ergebnisse vorgestellt und analysiert. Für einen visuellen Vergleich werden die ermittelten Werte und Parameter anhand von Diagrammen veranschaulicht sowie tabellarisch dargestellt. Aus Gründen der Nachvollziehbarkeit schließen sich nach der Darstellung einzelner Ergebnisse die jeweiligen Auswertungen an.

Die Buhck GmbH betreibt derzeit die Deponie Jahn, die der Deponieklasse II zuzuordnen ist. Nach den Zuordnungskriterien gemäß der Deponieverordnung [27] gelten folgende Grenzwerte für Chlorid, Sulfat, TOC sowie den DOC.

Tabelle 7: Deponieklassen für relevante Stoffe / Parameter [27]

Stoff / Parameter	Einheit	DK 0	DK I	DK II	DK III
Chlorid	mg/l	80	1500	1500	2500
Sulfat	mg/l	100	2000	2000	5000
TOC	M.-%	1	1	3	6
DOC	mg/l	50	50	80	100

Die LAGA Mitteilung 20 gibt dagegen strengere Grenzwerte vor, da es sich um keine Deponierung, sondern eine mögliche Verwendung in Form eines Einbaus des Materials handelt:

Tabelle 8: Zuordnungswerte für relevante Stoffe / Parameter in Bodenanwendungen [27]

Stoff / Parameter	Einheit	Z 0	Z 1.1	Z 1.2	Z 2
Chlorid	mg/l	30	30	50	100
Sulfat	mg/l	20	20	50	200
el. Leitfähigkeit	µS/cm	250	250	1500	2000

Allerdings gelten für die Nutzung von Bauschutt nach dessen Aufbereitung zum Sekundärbaustoff andere Grenzwerte gemäß LAGA:

Tabelle 9: Zuordnungswerte für relevante Stoffe / Parameter für Bauschutt [48]

Stoff / Parameter	Einheit	Z 0	Z 1.1	Z 1.2	Z 2
Chlorid	mg/l	10	20	40	150
Sulfat	mg/l	50	150	300	600
el. Leitfähigkeit	µS/cm	500	1500	2500	3000

In den Tabellen 10 und 11 sind die ermittelten Messgrößen der fünf Proben für zwei Korngrößenbereiche aufgeführt, die in einer Zeitspanne von etwa einem Monat wöchentlich untersucht wurden.

Tabelle 10: Übersicht der untersuchten Größen für Siebsand von 0 - 5,6 mm

Tag der Probe-nahme	24.09.19	30.09.19	08.10.19	15.10.19	22.10.19
Messgröße	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	2610	2700	2620	2880	2630
Sulfat [mg/L]	1730	1740	1510	1620	1560
Chlorid [mg/L]	68,4	76,1	63,6	83,3	48,1
TOC [Masse-%]	1,28	2,55	1,33	2,78	3,38
DOC [mg/L]	69,6	26,4	32,8	39,5	85,2

Die fünf Proben (Tabelle 10 und 11) werden hinsichtlich der aufgeführten Messgrößen miteinander verglichen, um Rückschlüsse ziehen und folglich Entscheidungen treffen zu können, wie mit dem untersuchten Material verfahren wird.

Tabelle 11: Übersicht der untersuchten Größen für Siebsand von 5,6 - 8 mm

Tag der Probe-nahme	24.09.19	30.09.19	08.10.19	15.10.19	22.10.19
Messgröße	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	2630	2900	2650	2820	2730
Sulfat [mg/L]	1640	1870	1530	1900	1720
Chlorid [mg/L]	58,8	9,43	71,6	97,8	62,1
TOC [Masse-%]	2,79	6,9	30,1	6,61	4,64
DOC [mg/L]	62	52,5	25,6	37,7	102

Es zeigen sich einige Ausreißer, auf die im jeweiligen Abschnitt eingegangen wird.

Der Großteil der nachfolgenden Diagramme enthält relevante Grenzwertmarkierungen, bei denen es sich um den Grenzwert für die Deponie Jahn (DK II) und den Zuordnungswert Z 2 jeweils für Bodenanwendungen und Bauschutt handelt. Die Relevanz dieses Zuordnungswertes äußert sich dadurch, dass bei dessen Einhaltung beziehungsweise einer Unterschreitung dieses Wertes ein Einbau des Materials erlaubt und demnach möglich ist. Wird dies nicht eingehalten, ist die Maßnahme der Deponierung vorgeschrieben.

Folgende Verläufe ergeben sich für die jeweiligen Parameter und Messgrößen:

Leitfähigkeit

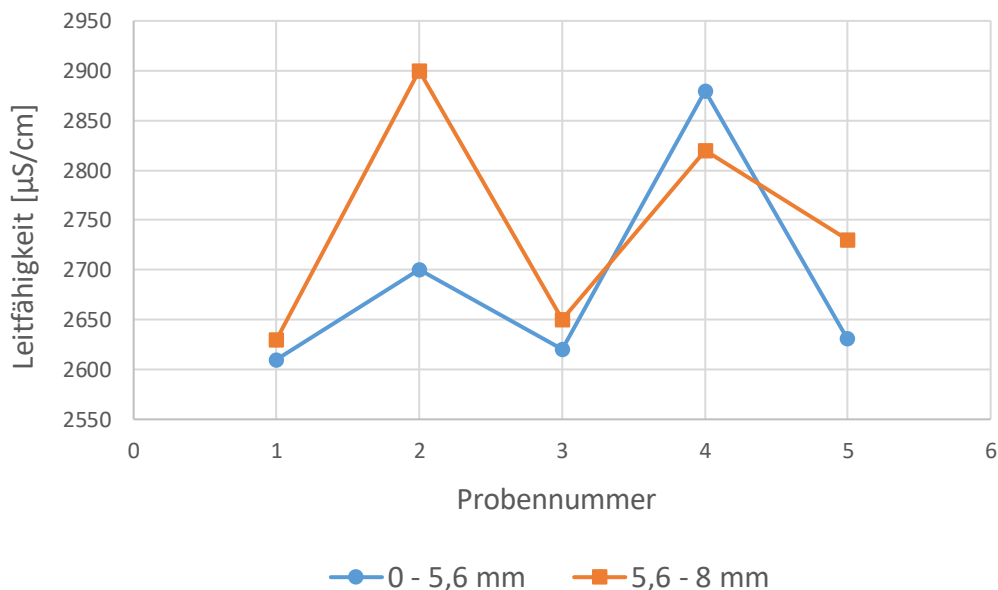


Abbildung 20: Leitfähigkeit der einzelnen Proben

In Abbildung 20 sind die fünf Proben für die Kornspektren 0 - 5,6 mm (blau) sowie 5,6 - 8 mm (orange) gegen die Leitfähigkeit, die über eine Leitfähigkeitssonde ermittelt wird, aufgetragen. Alle Messwerte befinden sich zwischen 2600 und 2900 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Vier der fünf Proben (bis auf Probe 4) der Reihe 0 bis 5,6 mm weisen niedrigere Leitfähigkeiten im Vergleich zu der Reihe 5,6 bis 8 mm auf. Eine mögliche Ursache dafür äußert sich in den vorkommenden Bestandteilen, die sich innerhalb der Fraktion befinden. Demzufolge enthält Material der Größe 5,6 bis 8 mm gewichtsbezogen mehr Anteil an mineralischer Substanz im Vergleich mit dem Größenspektrum 0 bis 5,6 mm. Dieser Umstand drückt sich durch entsprechend höhere Leitfähigkeiten der gröberen Fraktion in dem Diagramm aus. Je löslicher das im Mineral vorkommende Salz, desto höhere Werte nimmt die Leitfähigkeit an.

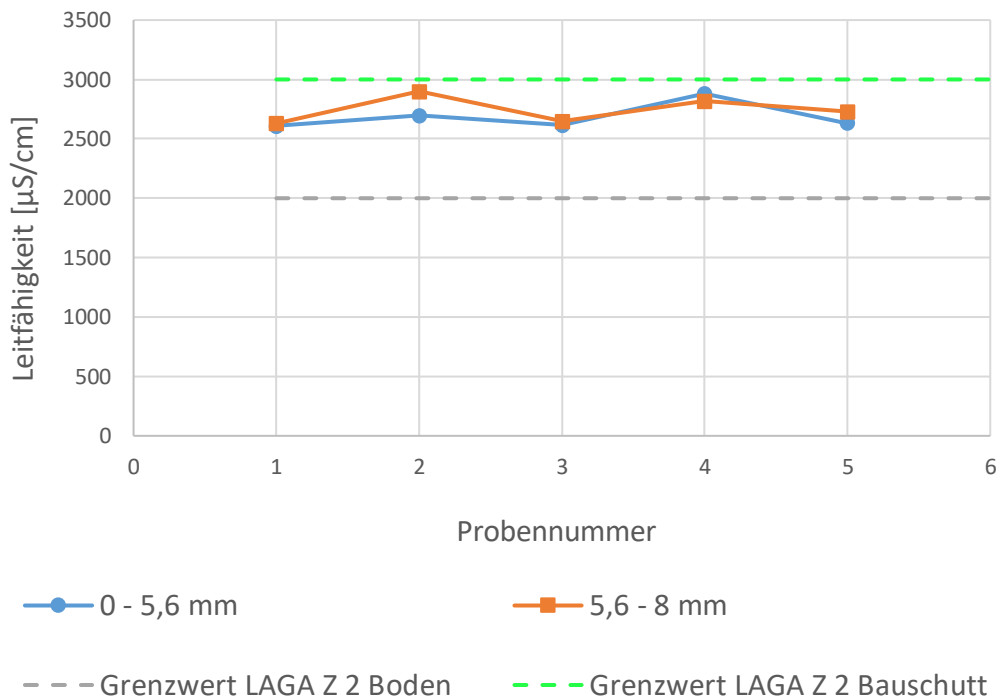


Abbildung 21: Leitfähigkeit der einzelnen Proben im Vergleich mit Grenzwerten

In Abbildung 21 sind die für die Leitfähigkeit zugehörigen Grenzwerte zu sehen. Alle Proben, die sich zwischen 0 bis 5,6 mm sowie 5,6 bis 8 mm befinden, unterschreiten den Grenzwert von 3000 $\mu\text{S/cm}$ und fallen damit in die Kategorie Z 2. Folglich darf das untersuchte Material - im Hinblick auf die Leitfähigkeit - für Einbauzwecke gemäß dem Zuordnungswert Z 2 genutzt werden. Für Boden Anwendungen eignet sich das Material nicht, da alle Leitfähigkeitsmesswerte über dem Zuordnungswert Z 2 Boden von 2000 $\mu\text{S/cm}$ liegen. Der Mittelwert für den blauen Verlauf liegt bei 2688 $\mu\text{S/cm}$ und der der orangen Werte bei 2746 $\mu\text{S/cm}$. Wird dieser Mittelwert berücksichtigt, so sind die Leitfähigkeiten über alle Proben hinweg ähnlich.

Sulfat

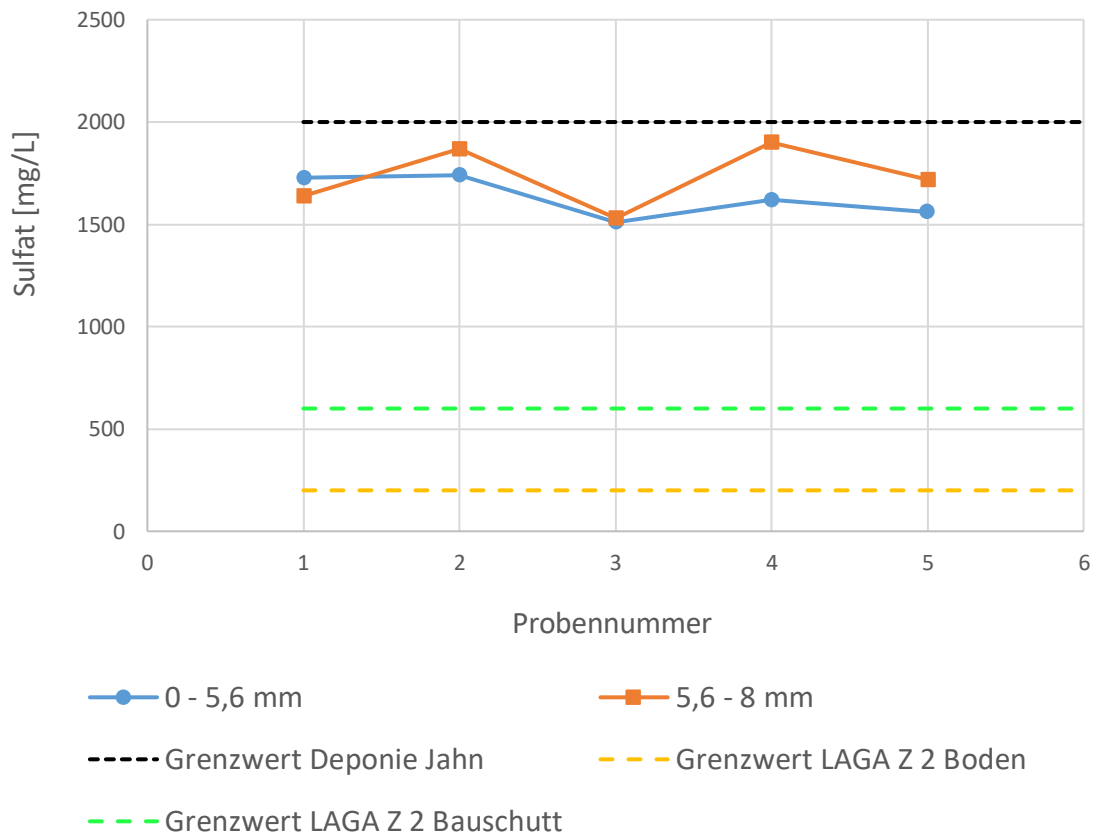


Abbildung 22: Sulfatgehalt der einzelnen Proben im Vergleich mit Grenzwerten

Bei den Sulfatgehalten zeigt sich ein relativ klares Bild, was sich im Verlauf der Sulfatanteile widerspiegelt. In Abbildung 22 verdeutlicht das Diagramm Sulfatgehalte von etwa 1500 bis 1900 mg/L. Allerdings wird ersichtlich, dass die Fraktion 0 bis 5,6 mm tendenziell geringere Konzentrationen an Sulfat aufweist, deren Maximum die zweite Probe mit 1740 mg/L hat. Bei der Fraktion 5,6 bis 8 mm erreichen die Proben 2 und 4 mit 1870 beziehungsweise 1900 mg/L Konzentrationen, die noch innerhalb des Grenzwertes DK II von bis zu 2000 mg/L Sulfat liegen. Insofern kann eine Ablagerung aller gemessenen Proben bezüglich der Sulfatmenge auf der Deponie Jahn erfolgen. Der Mittelwert für den blauen Verlauf liegt bei 1632 mg/L und der der orangenen Werte bei 1732 mg/L. Eine Einbaumöglichkeit gestaltet sich als schwierig und unrealistisch, zumal die Grenzwerte bei 600 mg/L (siehe Anhang) und niedriger liegen und durch verfügbare Maßnahmen zur Verringerung der Sulfatkonzentration nicht in so einem Ausmaß unterschritten werden können. Demnach ist ein Einbau ausgeschlossen.

Chlorid

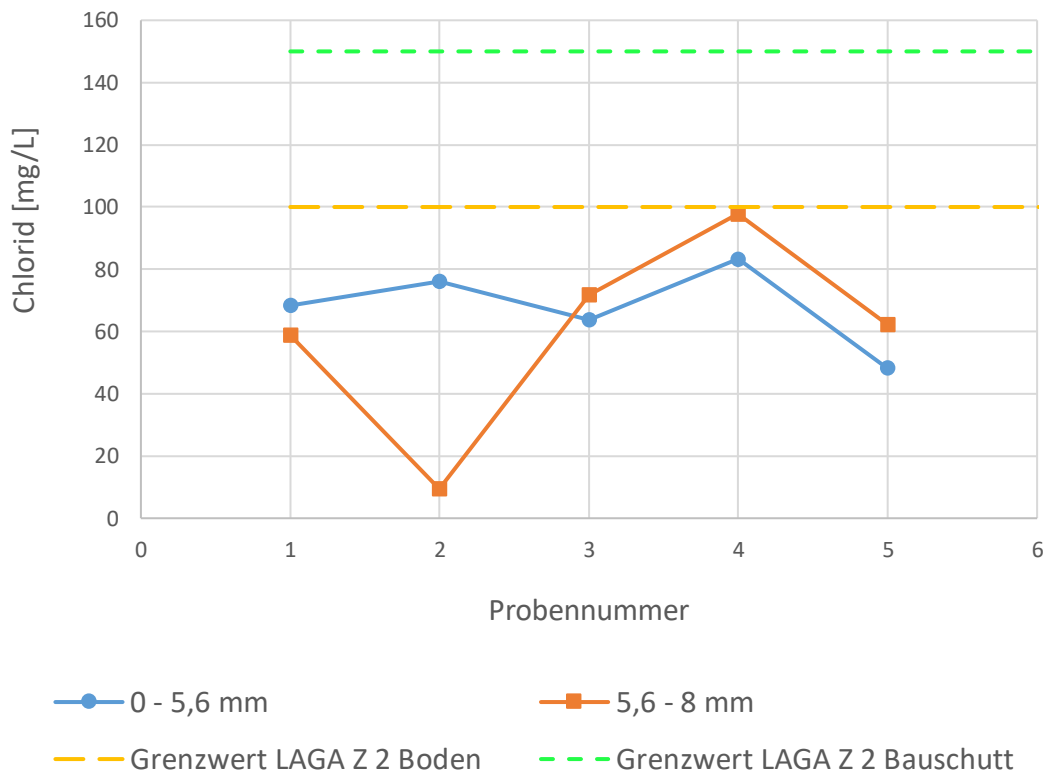


Abbildung 23: Chloridgehalt der einzelnen Proben im Vergleich mit Grenzwerten

Aus Gründen der Übersichtlichkeit und einer präziseren Differenzierung der einzelnen Werte wurde die Grenzwertmarkierung (2500 mg/L) für die Deponieklassen in Abbildung 23 weggelassen und findet sich im Anhang.

Der Abbildung 23 ist zu entnehmen, dass sowohl die feinere Fraktion (0 - 5,6 mm) als auch die Fraktion mit 5,6 - 8 mm jeweils unter den vorgegebenen Grenzwerten liegen. Dies unterstreicht die Gegebenheit, dass Chlorid zwar einen Störstoff kennzeichnet, dieser jedoch in der Regel keine kritischen Werte annimmt, die dazu führen, dass ausschließlich eine Deponierung die Folge ist.

Mit lediglich 9,43 mg/L Chloridanteil stellt die zweite Probe der Reihe 5,6 bis 8 mm hinsichtlich des Chloridgehalts eine Ausnahme dar. Dies lässt auf eine inhomogene Zusammensetzung schließen. Der Mittelwert für den blauen Verlauf liegt bei 67,9 mg/L und der der orangen Werte bei 59,9 mg/L. Insofern schlägt sich der Ausreißer mit 9,43 mg/L nicht allzu stark nieder.

Wird Material von jeglichen Sulfatquellen, die die Zuordnungswerte meistens deutlich überschreiten, befreit beziehungsweise separiert, kann eine Verwendung in Frage kommen. Allerdings gestalten sich derartige Vorgehensweisen als große Herausforderung, zumal Sulfat in den meisten Fällen als Gips (Calciumsulfat) vorliegt und dieser in nahezu jeder Korngröße vorhanden ist.

TOC

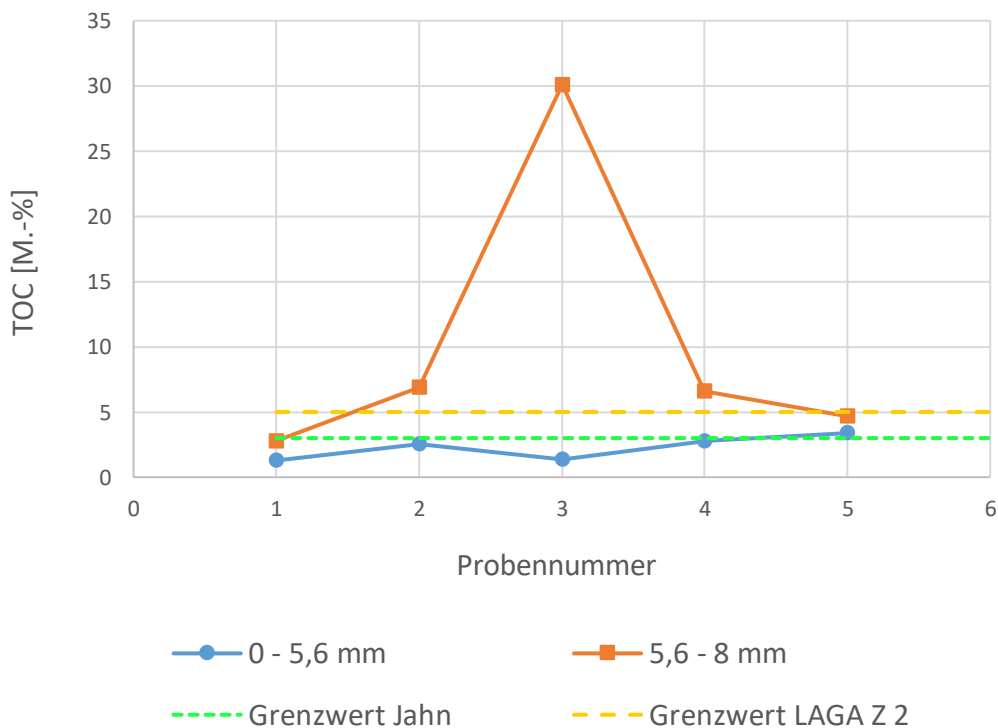


Abbildung 24: TOC-Gehalt der einzelnen Proben im Vergleich mit Grenzwerten

Abbildung 24 zeigt die resultierenden TOC-Konzentrationen - ausgedrückt in Massenprozent - der einzelnen Proben beider Versuchsreihen. Auffallend ist der Peak der dritten Probe aus der Charge 5,6 - 8 mm, der mit 30,1 Massenprozent überdurchschnittlich hoch ist. Dies ist auf organische Inhaltsstoffe (aus Holz, Styropor, Papier, etc.) zurückzuführen und somit ein Vorhandensein von Verunreinigungen in übermäßiger Form.

Abgesehen davon befinden sich bis auf Probe 5 alle Proben der Reihe 0 - 5,6 mm unterhalb der Deponieklasse II (3 M.-%), sodass das jeweilige Material auf der Deponie Jahn entsorgt werden kann, ohne dass Reaktionen ausgehend von Stoffen hoher TOC-Gehalte entstehen, die sich in negativer Weise auf die Umwelt auswirken. Stoffe, bei denen bis zu 6 Massenprozent an TOC festgestellt wird, sind für Deponien der Klasse DK III vorgesehen. Der Mittelwert für den blauen Verlauf liegt bei 2,26 Massenprozent und der der orangen Werte bei 10,21 Massenprozent. Hier zeigt sich, verglichen mit den anderen Untersuchungsgrößen, ein deutlicher Unterschied.

Neben der Deponierung gibt es zudem die Verwendungsmöglichkeit von TOC-behafteten Stoffen als weitere Option. Dies wird nach den Grenzwerten der LAGA Z 2 geregelt. Demnach können Stoffe mit TOC-Gehalten bis zu 5 Massenprozent für diverse Einbaumaßnahmen eingesetzt werden. Dies trifft bei Probe 5 der Charge 5,6 - 8 mm zu, die sich mit 4,64 Massenprozent organischer Kohlenstoffe zwischen dem Deponiegrenzwert DK II und dem LAGA Zuordnungswert Z 2 einordnet. Für TOC-Gehalte über 6 Massenprozent werden gesonderte Maßnahmen ergriffen, falls eine weitere Absenkung organischer Bestandteile nicht realisierbar ist.

DOC

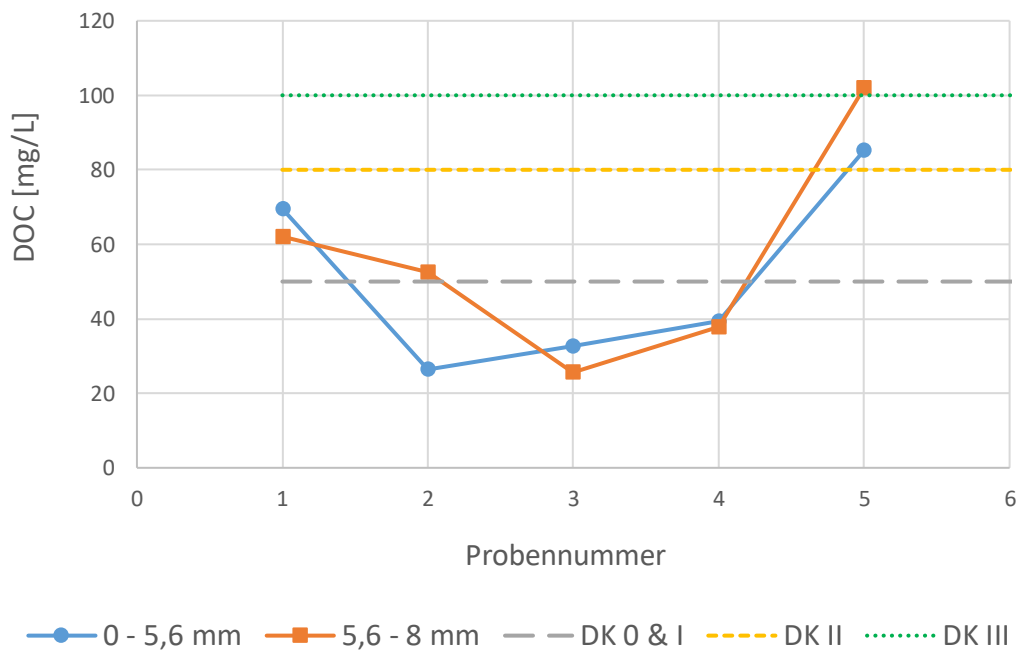


Abbildung 25: DOC-Gehalt der einzelnen Proben im Vergleich mit Grenzwerten

In Abbildung 25 sind die Konzentrationen an gelöstem organischem Kohlenstoff für beide Versuchsreihen sowie die zugehörigen Grenzwerte gemäß der Deponieverordnung dargestellt. Dabei ist festzustellen, dass beide Versuchsreihen in nahezu jedem Grenzwertbereich der Deponieklassen vertreten sind. So lässt sich anhand der Streuung der Messwerte eine Aussage treffen, inwieweit betroffene Stoffe, die beispielsweise in die DK III fallen (Probe 5 der Versuchsreihe 0 - 5,6 mm mit einem DOC von 85,2 mg/L), mittels Störstoffreduzierung und/oder der Herabsetzung von Störparametern in eine Deponie niedrigerer Klasse kategorisiert werden können. Derartige Überlegungen schaffen wirtschaftliche Vorteile in Form von Kostensenkungen, die beim Bau und Betrieb einer Deponie der Kategorie DK II gegenüber der Kategorie DK III zum Tragen kommen. Der Mittelwert für den blauen Verlauf liegt bei 50,7 mg/L und der der orangen Werte bei 55,9 mg/L. Dementsprechend beinhalten die Proben der blauen wie auch orangen Reihe ähnliche Mengen an organisch gelösten Kohlenstoffverbindungen.

Bezugnehmend auf die Charge 0 - 5,6 mm liegt die fünfte Probe mit einem DOC von 102 mg/L oberhalb des DK III - Grenzwerts. Jedoch unterliegen die Proben gewissen Schwankungen, die sich beispielsweise als Messunsicherheiten ausdrücken. Daher könnte eine erneute Messung andere Werte liefern. Geringe Toleranzen werden bei der Entscheidungswahl berücksichtigt.

Fazit

Gesamtheitlich betrachtet ist auffallend, dass der Sulfatanteil bei allen fünf Proben bei den Größenbereichen deutlich über den Grenzwerten liegt (siehe Anhang), nach denen ein Einbau in Frage kommen kann. Denkbar ist hierbei eine umfangreichere Fraktionierung der aufbereiteten Mengen auf mehrere Korngrößen, sodass Material größer 8 Millimeter in die Untersuchung miteinbezogen wird. Nach dem derzeitigen Stand der Technik lässt sich der Sulfatgehalt nicht unter die vorgegebenen Grenzwerte reduzieren. Es reicht aus, wenn ein einziger Parameter bzw. eine Größe einen Grenzwert überschreitet und beispielsweise den Bedingungen für eine Ablagerung in der DK II entspricht, damit das betroffene Material in der DK II deponiert wird. Dabei nehmen die restlichen Parameter bzw. Größen keinen Einfluss, selbst wenn diese unter den Grenzwerten einer DK II - Deponie liegen. Der Fokus sollte verstärkt auf den Sulfatgehalt gerichtet werden, um belastete Bauabfälle in Zukunft einer möglichen Verwendung zuzuführen. Aus bautechnischer Sicht kann Sulfat Schäden innerhalb von Beton verursachen, was sich bei Bauvorhaben gefährlich auswirken kann. Ferner kann Sulfat bei Kontakt mit metallischem Material Korrosionen begünstigen. Ein weiterer Aspekt ist das sogenannte Sulfatreiben. Es wird durch eine Reaktion der sulfathaltigen Lösungen mit Zement verursacht. Dabei lockert sich der Zement im Beton und es entstehen Spannungen, die zu Rissen und folglich zu Gefügeveränderungen und Abschwächungen des Materials führen [49, S.1]. Hinsichtlich der Umwelt kann Sulfat Versauerungen von Grundwasser und Boden bewirken [40, S.118]. Letztendlich ist Sulfat die kritische Größe, durch die ein Einbau von aufbereitetem Bauabfall verhindert wird. Jedoch ist es möglich, sulfathaltige Minerale aus Bauschutt zu separieren, die als Düngemittel eingesetzt werden können [46].

8 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In diesem Kapitel wird eine wirtschaftliche Kalkulation für Siebsand und dessen Entsorgungsschritte vorgestellt.

Im Regelfall weist Siebsand folgende tendenzielle Zusammensetzung auf:

- 50 % mineralische Bestandteile
- 30 % feinanteilige Korngrößen
- 15 % organisches Material (Holz, Kunststoffe, ...)
- 5 % anderweitige Fremdstoffe

Um die Entsorgungskosten zu ermitteln, wird eine Tonne Siebsand als Referenz genommen. Dabei wird folgendes Schema betrachtet:

Tabelle 12: Entsorgungskosten für 1 Tonne Siebsand

Material	Gewicht [t]	Kosten pro t	spez. Kosten [t]
Mineralik	0,5	0 €	0 €
Feinanteil	0,3	40 €	12 €
Organik	0,15	150 €	22,50 €
Fremdstoffe	0,05	150 €	7,50 €

In der Summe ergeben sich (gemäß Tabelle 12) Entsorgungskosten in Höhe von 42 € pro Tonne, wobei durchschnittliche Kosten von etwa 20 € pro Tonne für Aufbereitungsprozesse mitberücksichtigt werden und hinzukommen. Dadurch resultieren Entsorgungskosten von 62 € pro Tonne. Die organischen Bestandteile werden für die Verbrennung genutzt, während feinkörniges, störfstoffbelastetes Material in Deponien eingelagert wird. Die Verbrennung von 150 kg organischem Material erfordert Kosten von 22,50 €. Das Deponieren von 300 kg Feinanteil beläuft sich auf 12 €. Für die Mineralik fallen keine Kosten an, da Material dieser Art für eine direkte Verwendung beispielsweise als Verfüllung genutzt werden kann. Dementsprechend können sich Erlöse in Höhe von etwa 10 € pro Tonne ergeben.

Für 1 Tonne Siebsand, der in seiner Gesamtheit vorliegt und nicht in Fraktionen aufgeteilt wird, belaufen sich die Kosten für die Entsorgung auf 40 €/t. Insofern stehen 40 Euro pro Tonne Siebsand, der als eine „Einheit“ betrachtet wird, gegenüber 62 Euro

pro Tonne aufgetrennten Siebsand (Tabelle 12) inklusive der jeweiligen Aufbereitungsprozesse.

Indem die aufgelisteten Materialien in Tabelle 12 in ihrer Zusammensetzung durch innovative Verfahren verändert werden, können Kosten eingespart werden. Darüber hinaus sollten Aufbereitungsverfahren in ihrem Wirkungsgrad optimiert oder die Entwicklung neuer Methoden (gemäß dem Stand der Technik in Kap. 5) vorangetrieben werden.

Eine Verschiebung der Siebsandzusammensetzung in Richtung mineralischer Anteile ermöglicht eine Reduzierung der organischen Komponenten. Da die Verbrennung mit 150 € pro Tonne mitunter den höchsten Verwertungspfad darstellt, ist das Senken der Organik erstrebenswert. Wird beispielsweise der organische Anteil im Siebsand von ursprünglich 150 kg je Tonne auf 120 kg pro Tonne herabgesetzt, wobei die Differenz sich auf das restliche Material verteilt, wirkt sich dies wie folgt aus:

Tabelle 13: Entsorgungskosten für 1 Tonne Siebsand bei veränderter Zusammensetzung

Material	Gewicht [t]	Kosten pro t	spez. Kosten [t]
Mineralik	0,51	0 €	0 €
Feinanteil	0,31	40 €	12,40 €
Organik	0,12	150 €	18 €
Fremdstoffe	0,06	150 €	9 €

In Tabelle 13 wird ersichtlich, dass sich die Materialzusammensetzung mittels gezielter Verminderung organischen Materials umverteilt hat. Als Folge ergeben sich Kosten in Höhe von 39,40 Euro pro Tonne (rechte Spalte der Tabelle 13). An dieser Stelle ergibt sich eine Differenz von 2,60 €, da sich die Kosten im ersten Fall (Tabelle 12) auf 42 Euro pro Tonne belaufen.

Buhck verzeichnet jährlich einen Anfall von Siebsand in der Größenordnung von 10.000 Tonnen. Eine Ersparnis von 2,60 € pro Tonne bedeutet, dass in einem Jahr 26.000 Euro gewinnbringender Anteil erzielt werden kann.

9 Umgang des Recyclingaspekts im Ausland

Eine Verwertung von Bauabfällen wird in der Regel bei einem wirtschaftlichen Gewinn eines Betriebes vorgenommen. Im Hinblick auf die Abfallwirtschaft in der Schweiz nimmt die Abfallbehandlung und -ablagerung einen geringeren Stellenwert als das Verwerten von Abfällen ein [50, S.10].

Nach [51, S.2] zeigen sich deutliche Differenzen bei den Recyclingraten in Europa. Dabei erzielen nördlich gelegene Länder (Deutschland, Niederlande, Belgien, Dänemark) Recyclingquoten von über 80%, wohingegen die Quote von Ländern im Süden Europas (Spanien, Portugal, Griechenland) unter 20% liegt.

In Dänemark wurde ein Verfahren entwickelt, das dem Recycling von Gips dient und seit 2001 Verwendung findet. Dieses Verfahren trennt Gipsabfälle in Komponenten auf, wodurch Gips mit Reinheitsgraden von über 95% zurückgewonnen werden kann. Nach der Entwicklung dieses Verfahrens kommt es in weiteren Ländern zum Einsatz [52, S.2-3].

Davon abgesehen sind Grenzwertvorgaben im Ausland für die Bauabfallentsorgung verglichen mit den Vorschriften in Deutschland nicht so streng formuliert. Daher finden Abfalltransporte vermehrt ins Ausland statt, nicht zuletzt aufgrund größerer Deponiekapazitäten. Für Niederlande ergibt sich daraus die Option, angelieferten mineralischen Bauabfall für die Landgewinnung sowie dem Schutz von Küsten zu nutzen [53].

Bereits in den achtziger Jahren war ein Ersatz natürlicher Zuschläge für Beton erforderlich, was in Ländern wie Frankreich, Belgien, Niederlande, Japan und USA deutlich wurde. Ferner hat sich im südasiatischen Staat Bangladesch Ziegelsplitt als Alternative für die Betonherstellung erwiesen. Dies macht deutlich, dass diverse Bestandteile im Bauschutt für einen möglichen Zuschlagstoff infrage kommen [54, S.4].

10 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Im Hinblick auf die Recyclingfähigkeit von mineralischen Siebsandfraktionen aus Bauabfällen wird thematisiert, welche Parameter für die Aufbereitung und Verwertung anfallender Abfälle aus Bau- und Abbruchtätigkeiten von Relevanz sind. Dabei sind die Vorgaben relevanter Gesetze und Verordnungen einzuhalten, in denen zulässige Grenzwerte für jene Parameter formuliert werden.

Die Aufbereitung von Bauabfällen umfasst die Zerkleinerung des groben Ausgangsmaterials mithilfe von Brech- und Mühlenanlagen. Daran schließt sich die Trennung des zerkleinerten Materials nach Dichte / Farbe (Sortiermethode) und / oder Korngröße (Klassiermethode) an. Bei der Trennung wird zwischen trockenen Trennprozessen und Nassaufbereitungsverfahren differenziert. Durch beide Maßnahmen können im Bauabfall befindliche Störstoffgehalte herabgesetzt werden. Ist eine Verwertung jeglicher Art nicht zielführend beziehungsweise führt zu keiner Unterschreitung vorgegebener Grenzwerte, ist die Einlagerung in einer Deponie erforderlich.

Ferner konnten Erkenntnisse gewonnen werden, die sich auf die durchgeführten Versuche im Rahmen dieser Arbeit stützen. Es stellt sich heraus, dass Siebsand der Fraktion 0 bis 5,6 Millimeter für die fünf Proben nur geringfügige Unterschiede bei den ermittelten Feststoff- (TOC) und Eluatwerten (Leitfähigkeit, Sulfat, Chlorid, DOC) aufweist. Ein ähnliches Ergebnis liefern die Proben der Fraktion 5,6 bis 8 Millimeter. Allerdings zeigen sich hier deutlichere Unterschiede bei den ermittelten Werten zwischen den einzelnen Proben als bei der Reihe 0 bis 5,6 Millimeter, das sich vor allem bei den Parametern bemerkbar macht.

Generell lässt sich sagen, dass Stoffe bzw. Materialien, die für Einbaumaßnahmen aufgrund überhöhter Störstoffanteile ungeeignet sind, neben derer Deponierung als Stoffe verwendet werden können, bei denen kein Einbau stattfindet. Dieser Umstand schließt den Einsatz in der Zement- / Betonindustrie aus, jedoch sind anderweitige Nutzungsmöglichkeiten denkbar. Hierzu zählen die Verfüllung, Verdichtung, der Einbau im Straßenbau sowie die Verwendung als Bettungsmaterial.

Sofern Stoffe infolge zu hoher Störstoffbelastung deponiert werden müssen, sollte gewährleistet sein, dass die Deponie nach außen hin abgedichtet ist, damit es zu keiner unerwünschten Reaktion von Stoffen hoher Leitfähigkeiten mit der Umwelt oder anderen Stoffen führt.

Ausblick

Neben den bestehenden Verfahren, die etablierte Aufbereitungs- und Verwertungsverfahren für Bauabfall darstellen, besteht eine weitere Möglichkeit darin, die einzelnen Komponenten im Abfall unter Zuhilfenahme der Mikroskopie zu untersuchen. Auf diese Weise könnten Aussagen über die Struktur der verschiedenen Abfallbestandteile abgeleitet werden. Demnach wäre denkbar, anhand der vorliegenden Gefügestruktur neue Ansätze für den Umgang mit Bauabfällen und deren Behandlung zu finden.

Ob der Fokus in Zukunft verstärkt auf den Nassaufbereitungsverfahren liegen wird, steht noch aus. Für diese Entscheidung sollte zwischen den Vorteilen hinsichtlich resultierender Trennschärfen gegenüber trockenen Verfahren, aber auch die kostenintensive Abwasserbehandlung abgewägt werden.

Ferner stellt sich die Frage, ob die Akzeptanz für aufbereitete Sekundärbaustoffe weiterhin fortbestehen und gesteigert werden kann. Die Nachfrage nach Primärbaustoffen kann durch deren Versteuerung zurückgehen, sodass Sekundärbaustoffe zunehmend an Bedeutung gewinnen. Angesichts der fortschreitenden Engpässe bei den Deponiekapazitäten wie auch der Rückgang an natürlichen Ressourcen sollte intensiv auf die Aufbereitung von Bauabfällen hin zur Verwertung von Sekundärbaustoffen hingearbeitet werden. Letztendlich ist es nur eine Frage der Zeit, bis die steigende Zahl an Deponien gravierende Umweltbeeinträchtigungen verursacht und begrenzt verfügbare Ressourcen aufgebraucht sind. Um dem entgegenzuwirken, sollte der Recyclingaspekt in Zukunft eine prioritäre und vorrangige Position einnehmen.

Literaturverzeichnis

- [1] I. Bodden, J. Cronjaeger, J. Decker, M. Eurich, J. Finkenstein, S. Herold, U. Seidel und M. Verheyen, „Merkblatt "Entsorgung von Bauabfällen",“ 01 09 2018. [Online]. Available: https://rp-kassel.hessen.de/sites/rp-kassel.hessen.de/files/Baumerkblatt_2018-09-01_0.pdf. [Zugriff am 25 08 2019].
- [2] D.-I. L. B. Zorn, „<https://www.schleswig-holstein.de>,“ 16 11 2006. [Online]. Available: https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/A/abfallwirtschaft/Downloads/abfalltagungen/2006_zorn.pdf?__blob=publicationFile&v=2. [Zugriff am 26 08 2019].
- [3] „Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit,“ 01 06 2012. [Online]. Available: <https://www.bmu.de/gesetz/gesetz-zur-foerderung-der-kreislaufwirtschaft-und-sicherung-der-umweltvertraeglichen-bewirtschaftung-v/>. [Zugriff am 27 08 2019].
- [4] „Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen (Gewerbeabfallverordnung – GewAbfV),“ 2017.
- [5] Just, „Justizportal Nordrhein-Westfalen,“ [Online].
- [6] Wolters Kluwer Deutschland GmbH, „Lexsoft,“ 20 12 2019. [Online]. Available: http://www.lexsoft.de/cgi-bin/lexsoft/justizportal_nrw.cgi?t=157668797444252539&sessionID=14963105171283280428&templateID=htmltopdf&xid=3564633,2. [Zugriff am 30 08 2019].
- [7] „Bayerisches Landesamt für Umwelt,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.lfu.bayern.de/abfall/inertabfalldeponien/index.htm>. [Zugriff am 30 08 2019].
- [8] Regierungspräsidium Gießen, „<https://rp-giessen.hessen.de>,“ [Online]. Available: <https://rp-giessen.hessen.de/umwelt-natur/abfall/deponien/deponieklassen>. [Zugriff am 01 09 2019].

- [9] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, „www.bmu.de,“ [Online]. Available: <https://www.bmu.de/faqs/mantelverordnung/>. [Zugriff am 01 09 2019].
- [10] Lenntech BV, „Chlor und Wasser,“ [Online]. Available: <https://www.lenntech.de/element-und-wasser/chlor-und-wasser.htm>. [Zugriff am 02 09 2019].
- [11] D.-I. K. Weimann und D.-I. J. Matyschik, „Sulfate in Bauschutt -Herkunft und Auswirkungen-,“ Berlin.
- [12] L. Antonets, „Nextews,“ 2017. [Online]. Available: <http://de.nextews.com/a4da1a89/>. [Zugriff am 06 09 2019].
- [13] Niedersächsische Gesellschaft zur Endablagerung von Sonderabfall mbH, 05 2013. [Online]. Available: <https://www.ngsmbh.de/bin/pdfs/Zuordnungswerte.pdf> . [Zugriff am 08 09 2019].
- [14] Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich, „Recycling-Baustoffverordnung,“ 29 06 2015. [Online]. Available: https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblAuth/BGBLA_2015_II_181/BGBLA_2015_II_181.pdfsig. [Zugriff am 14 09 2019].
- [15] Ingenieurbüro für Material- und Umweltanalytik GmbH, „Entsorgung von Boden & Bauschutt,“ 2016. [Online]. Available: https://www.ifmu.de/wp-content/uploads/a01_IfMU_Bauherren-Infoblatt_Verwertung.pdf. [Zugriff am 17 09 2019].
- [16] A. Battermann und S. Macke, „Hausarbeit zum Fachgebiet Abfallwirtschaft,“ 2000. [Online]. Available: <http://bauingenieurseite.de/abfallwirtschaft/bauschutt.html#ds-dokumente-ausgabe1-4-99>. [Zugriff am 17 09 2019].
- [17] Gunt Hamburg, „Gunt Gerätbau GmbH,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.gunt.de/de/produkte/prozesstechnik/mechanische-verfahrenstechnik/trennverfahren-trennung-im-fliehkraftfeld/hydrozyklon/083.22500/ce225/glct-1:pa-119:ca-233:pr-16>. [Zugriff am 18 09 2019].

- [18] Umweltbundesamt für Mensch und Natur, „Optimierung des Rückbaus / Abbruchs von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-Materials,“ 05 2013. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4430.pdf>. [Zugriff am 20 09 2019].
- [19] S. Wanka, „Technische Universität Braunschweig,“ 2017. [Online]. Available: https://publikationsserver.tu-braunschweig.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbbs_derivate_00044128/Diss_Wanka_Sebastian.pdf. [Zugriff am 21 09 2019].
- [20] Gunt Hamburg, 2019. [Online]. Available: https://www.gunt.de/images/download/Wasserbehandlung-Broschre_german.pdf. [Zugriff am 25 09 2019].
- [21] D.-I. F. Schwarzkopp, D.-I. J. Drescher, P. D. M. Gornig und P. D. J. Blazejczak, „Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e.V. ; Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine- und-Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland,“ 2019. [Online]. Available: https://www.baustoffindustrie.de/fileadmin/user_upload/bbs/Dateien/Download_archiv/Rohstoffe/BBS_Rohstoffstudie_2019.pdf. [Zugriff am 26 09 2019].
- [22] Gunt Gerätebau GmbH, „Windsichtung,“ 02 2019. [Online]. Available: https://www.gunt.de/images/datasheet/24/CE-275-Windsichtung-gunt-24-pdf_1_de-DE.pdf. [Zugriff am 30 09 2019].
- [23] Retsch GmbH, „Vibrationssiebmaschine,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.retsch.de/de/produkte/sieben/siebmaschinen/as-200-control/funktion-merkmale/>. [Zugriff am 02 10 2019].
- [24] D. Jensen, „Thermo Fisher Scientific, Grundlagen der Ionenchromatographie,“ 12 2013. [Online]. Available: <http://apps.thermoscientific.com/media/cmd/GrundlagenIonenchromatographie.pdf?src=bTtxt&elqtrack=true>. [Zugriff am 03 10 2019].
- [25] Thermo Fischer Scientific, „Dionex ISC-1100 Ion Chromatography,“ 10 2012. [Online]. Available: <http://tools.thermofisher.com/content/sfs/manuals/73269->

- Man-IC-ICS1100-Operators-Oct2012-DOC065289-03.pdf . [Zugriff am 04 10 2019].
- [26] Skalar, „Total Organic Carbon & Total Nitrogen Analyzers,“ 2010. [Online]. Available: <https://www.thermofisher.com.au/Uploads/file/Environmental-Industrial/Environmental-Monitoring-Safety/Automated-Analysis/Skalar-Formacs-TOC-TN.pdf>. [Zugriff am 04 10 2019].
- [27] Fraunhofer Institut für Bauphysik, „ENSUBA,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.ibp.fraunhofer.de/de/projekte-referenzen/ensuba.html> . [Zugriff am 06 10 2019].
- [28] Enbause, „Recycling gewinnt Wertstoff Sand zurück,“ 26 10 2018. [Online]. Available: <https://www.enbause.de/daemmung/aktuelles/artikel/recycling-gewinnt-wertstoff-sand-zurueck-6137.html>. [Zugriff am 08 10 2019].
- [29] Geo-, Umwelt- und Baudienstleistungen, „Zuordnungswerte für Bauschutt der LAGA M 20,“ 01 2017. [Online]. Available: https://gubd.de/content/pdf/020_LAGA_M_20_Zuordnungswerte_Einstufung_Bauschutt_2016-04.pdf. [Zugriff am 09 10 2019].
- [30] H. Pöllmann und J. Göske, „Bauschäden durch mineralische Treiberscheinungen,“ 04 2011. [Online]. Available: http://archiv.aktuelle-wochenschau.de/druck/2011/wochenschau40_2011.pdf. [Zugriff am 10 10 2019].
- [31] Bundesamt für Umwelt, „Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle,“ 2006. [Online]. Available: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/publikationen-studien/publikationen/richtlinie-verwertung-mineralischer-bauabfaelle.html>. [Zugriff am 11 10 2019].
- [32] G. Wolff, „EU-Entwicklungen im Bereich der Bauabfälle,“ [Online]. Available: http://www.qrb-bw.de/home/pdf_pool/3_Gunther%20Wolff-EU-Entwicklungen.pdf . [Zugriff am 14 10 2019].
- [33] R. H. Meier, „Gipsrecycling senkt Abfallkosten,“ 2007. [Online]. Available: https://www.applica.ch/applica/Ausgaben/2007/07-13-14/13-14-07_Rolf%20H.%20Meier_Gips-Recycling%20senkt%20Abfallkosten.pdf . [Zugriff am 16 10 2019].

- [34] R.-R. Schulz, „Recycling von Baurestmassen - Ein Beitrag zur Kostendämpfung im Bauwesen,“ Fraunhofer IRB Verlag, Aachen, 1986.
- [35] „Brandhorst Bonn,“ [Online]. Available: https://www.brandhorst-bonn.de/fileadmin/user_upload/pdf/Salze.pdf. [Zugriff am 02 09 2019].
- [36] M. Kranert und K. Cord-Landwehr, „Einführung in die Abfallwirtschaft,“ 2010. [Online]. Available: <https://rd.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-8348-9681-0.pdf>. [Zugriff am 24 08 2019].
- [37] M. S. F. Kaiser und D.-I. R. Oetjen-Dehne, „Aufbereitung von gefährlichen Bau- und Abbruchabfällen im Land Berlin,“ 28 05 2019. [Online]. Available: <https://www.berlin.de/senuvk/umwelt/abfallwirtschaft/de/sonderabfall/ressourcenschutz/download/Grundlagenpapier-Aufbereitung-gef-Bauabfaelle.pdf>. [Zugriff am 24 08 2019].
- [38] „Gabi-Software,“ 2019. [Online]. Available: <http://www.gabi-software.com/deutsch/loesungen/kreislaufwirtschaft/>. [Zugriff am 27 08 2019].
- [39] „Europäisches Parlament,“ 12 04 2018. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/priorities/kreislaufwirtschaft/20151201STO05603/kreislaufwirtschaft-definition-und-vorteile>. [Zugriff am 28 08 2019].
- [40] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, „Kreislaufwirtschaftsgesetz,“ 2017. [Online]. Available: https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/_6.html. [Zugriff am 28 08 2019].
- [41] „Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall,“ 05 11 2019. [Online]. Available: https://www.laga-online.de/documents/uebersicht_mitteilungen_november-2019_cms_1572955605.pdf. [Zugriff am 29 09 2019].
- [42] LAGA, „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen - Technische Regeln - Allgemeiner Teil,“ 11 2003. [Online]. Available: <https://www.umwelt-online.de/regelwerk/cgi-bin/suchausgabe.cgi?pfad=/abfall/laga/min1.htm&such=Einbau>. [Zugriff am 29 08 2019].
- [43] „Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA),“ 2003. [Online]. Available: <https://www.laga-online.de/>. [Zugriff am 29 08 2019].

- [44] LAGA - Länderarbeitsgemeinschaft Abfall, „LAGA 20 - Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen,“ 2003. [Online]. Available: <https://www.umwelt-online.de/regelwerk/cgi-bin/suchausgabe.cgi?pfad=/abfall/laga/min1.htm&such=Einbau>. [Zugriff am 15 09 2019].
- [45] T. Seilnacht, „Sulfate,“ [Online]. Available: <https://www.seilnacht.com/Lexikon/Sulfate.htm>. [Zugriff am 03 09 2019].
- [46] T. Seilnacht, „Calciumsulfat,“ [Online]. Available: https://www.seilnacht.com/Chemie/ch_caso4.htm. [Zugriff am 03 09 2019].
- [47] H. Bannwarth, P. B. Kremer und A. Schulz, „Basiswissen Physik, Chemie und Biochemie,“ 2019. [Online]. Available: <https://rd.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-662-58250-3.pdf>. [Zugriff am 04 09 2019].
- [48] A. Müller, „Baustoffrecycling, Entstehung-Aufbereitung-Verwertung,“ 2018. [Online]. Available: <https://rd.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-658-22988-7.pdf> .
- [49] Fachhochschule Südwestfalen, „Leitfähigkeit,“ [Online]. Available: https://www4.fh-swf.de/media/downloads/fbin/wissenschaftlichemitarbeiter/roloff/extern_7/grundlagen_der_messtechnik_/Grundlagen_zur_Leitfaehigkeitsmessung.pdf. [Zugriff am 06 09 2019].
- [50] J. Tomas, T. Gröger, C. Kuchler und J. Friedrichs, „Abtrennen von Wertstoffen aus Bauschutt,“ 1999. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/cite.330710619>. [Zugriff am 14 09 2019].
- [51] H. Martens und D. Goldmann, „Recyclingtechnik- Fachbuch für Lehre und Praxis,“ 2016. [Online]. Available: <https://rd.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-658-02786-5.pdf>.
- [52] Verband für Abbruch und Entsorgung, „Droht ein Entsorgungsnotstand für mineralische Bau- und Abbruchabfälle?,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.abbruch-mv.de/2018/07/16/droht-ein-entsorgungsnotstand-fuer-mineralische-bau-und-abbruchabfaelle/>. [Zugriff am 18 10 2019].

- [53] Anwaltskanzlei Steiner, „Vortrag Steiner,“ 14 10 2015. [Online]. Available: <https://www.hamburg.de/contentblob/4629386/d48abe9c4a0e15e3d77bb008eac26362/data/d-vortrag-steiner-tagung-bodenmanagement.pdf>. [Zugriff am 06 09 2019].
- [54] S. Köppel und M. Denner, „DOC/TOC im Eluat von Abfällen aus der MBA,“ 2010. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0298.pdf>. [Zugriff am 12 09 2019].

Anhang

Anhang A: Messergebnisse und entsprechende Grenzwerte für Leitfähigkeit

Gemessene Leitfähigkeiten für 0 - 5,6 mm

Messgröße	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	2610	2700	2620	2880	2630

Gemessene Leitfähigkeiten für 5,6 - 8 mm

Messgröße	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	2630	2900	2650	2820	2730

Ausschnitt der Tab. 8: Zuordnungswerte für relevante Stoffe / Parameter in Boden-
wendungen

Stoff / Parameter	Einheit	Z 0	Z 1.1	Z 1.2	Z 2
el. Leitfähigkeit	$\mu\text{S}/\text{cm}$	250	250	1500	2000

Ausschnitt der Tab. 9: Zuordnungswerte für relevante Stoffe / Parameter für Bauschutt

Stoff / Parameter	Einheit	Z 0	Z 1.1	Z 1.2	Z 2
el. Leitfähigkeit	$\mu\text{S}/\text{cm}$	500	1500	2500	3000

Anhang B: Messergebnisse und entsprechende Grenzwerte für Sulfat

Gemessene Sulfatgehalte für 0 - 5,6 mm

Messgröße	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
Sulfat [mg/L]	1730	1740	1510	1620	1560

Gemessene Sulfatgehalte für 5,6 - 8 mm

Messgröße	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
Sulfat [mg/L]	1640	1870	1530	1900	1720

Ausschnitt der Tab. 8: Zuordnungswerte für relevante Stoffe / Parameter in Boden-
wendungen

Stoff / Parameter	Einheit	Z 0	Z 1.1	Z 1.2	Z 2
Sulfat	mg/l	20	20	50	200

Ausschnitt der Tab. 9: Zuordnungswerte für relevante Stoffe / Parameter für Bauschutt

Stoff / Parameter	Einheit	Z 0	Z 1.1	Z 1.2	Z 2
Sulfat	mg/l	50	150	300	600

Ausschnitt der Tab. 7: Deponieklassen für relevante Stoffe / Parameter

Stoff / Parameter	Einheit	DK 0	DK I	DK II	DK III
Sulfat	mg/l	100	2000	2000	5000

Anhang C: Messergebnisse und entsprechende Grenzwerte für Chlorid

Gemessene Chloridgehalte für 0 - 5,6 mm

Messgröße	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
Chlorid [mg/L]	68,4	76,1	63,6	83,3	48,1

Gemessene Chloridgehalte für 5,6 - 8 mm

Messgröße	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
Chlorid [mg/L]	58,8	9,43	71,6	97,8	62,1

Ausschnitt der Tab. 8: Zuordnungswerte für relevante Stoffe / Parameter in Boden-
wendungen

Stoff / Parameter	Einheit	Z 0	Z 1.1	Z 1.2	Z 2
Chlorid	mg/l	30	30	50	100

Ausschnitt der Tab. 9: Zuordnungswerte für relevante Stoffe / Parameter für Bauschutt

Stoff / Parameter	Einheit	Z 0	Z 1.1	Z 1.2	Z 2
Chlorid	mg/l	10	20	40	150

Ausschnitt der Tab. 7: Deponieklassen für relevante Stoffe / Parameter

Stoff / Parameter	Einheit	DK 0	DK I	DK II	DK III
Chlorid	mg/l	80	1500	1500	2500

Anhang D: Messergebnisse und entsprechende Grenzwerte für TOC

Gemessener TOC für 0 - 5,6 mm

Messgröße	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
TOC [Masse-%]	1,28	2,55	1,33	2,78	3,38

Gemessener TOC für 5,6 - 8 mm

Messgröße	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
TOC [Masse-%]	2,79	6,9	30,1	6,61	4,64

Ausschnitt der Tab. 7: Deponieklassen für relevante Stoffe / Parameter

Stoff / Parameter	Einheit	DK 0	DK I	DK II	DK III
TOC	M.-%	1	1	3	6

Anhang E: Messergebnisse und entsprechende Grenzwerte für DOC

Gemessener DOC für 0 - 5,6 mm

Messgröße	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
DOC [mg/L]	69,6	26,4	32,8	39,5	85,2

Gemessener DOC für 5,6 - 8 mm

Messgröße	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
DOC [mg/L]	62	52,5	25,6	37,7	102

Ausschnitt der Tab. 7: Deponieklassen für relevante Stoffe / Parameter

Stoff / Parameter	Einheit	DK 0	DK I	DK II	DK III
DOC	mg/l	50	50	80	100

Anhang F: interne Arbeitsanweisung aus dem Buhck Labor

Labor Dr.Freytag&Partner	Arbeitsanweisung	Datum: 15.02.16
	Bestimmung der gelösten Anionen Fluorid, Chlorid, Nitrit, Orthophosphat, Bromid, Nitrat und Sulfat mittels Ionenchromatographie	Seite: 1 von 3

1. Geräte

DIONEX ICS1100 - Ionenchromatograph

DIONEX AS-DV - Autosampler

diverse Glaskolben und Pipetten

Ultraschallbad

2. Chemikalien

Reinstwasser

Gekaufte Stammlösungen als Einzelsubstanz alle in 1000mg/l zum Ansatz der Kontrollproben (Chlorid, Sulfat, Bromid, Phosphat, Fluorid, Nitrit, Nitrat)

Natriumhydrogencarbonat

Natriumcarbonat

Für die Herstellung der Kalibration werden gekaufte Stammlösungen, jedoch andere Chargen verwendet.

3. Ansatz der Kontrollproben

Aus den 7 Einzelsubstanzen wird unter Verwendung von Reinstwasser ein Standard von 50mg/l, 25mg/l, 10mg/l, 2,5 mg/l und ein weiterer von 1mg/l hergestellt.

4. Eluentherstellung

Stammlösung

16,8g Natriumhydrogencarbonat und 67,8g Natriumcarbonat in einem Liter Reinstwasser lösen. Diese Stammlösung hält 6 Monate.

Eluent für IC

5 ml Stammlösung auf 1 Liter mit Reinstwasser auffüllen, 60 min mit aufgeschraubtem Deckel ins Ultraschallbad stellen. Täglich frisch herstellen.

0,35 mol/l Natriumcarbonat

0,1 mol/l Natriumhydrogencarbonat

Labor Dr.Freytag&Partner	Arbeitsanweisung	Datum: 15.02.16 Seite: 2 von 3
	Bestimmung der gelösten Anionen Fluorid, Chlorid, Nitrit, Orthophosphat, Bromid, Nitrat und Sulfat mittels Ionenchromatographie	

5. Probenvorbereitung

Alle Proben werden durch einen Membranfilter 0,45µm filtriert. Proben mit einer Leitfähigkeit über 250 µs/cm werden entsprechend verdünnt.

6. Durchführung

Der IC und der Autosampler werden nach Angaben des Geräteherstellers eingeschaltet und ca. 30 min warm laufen lassen. Wenn die Basislinie stabil läuft wird das Gerät mit den Proben bestückt, eine Liste geschrieben und gestartet. Verdünnte Proben werden mit der Verdünnung angegeben, das Gerät zeigt den Messwert und den errechneten Wert an. Am Anfang und am Ende jeder Messserie zusätzlich bei großen Serien nach jeder 20. Probe, werden zwei Kontrollen unterschiedlicher Konzentration gestellt.

7. Auswertung und Berechnung

- Kontrolle der Standardproben 1mg/l und 10 mg/l(+-10% Abweichung)
- Kontrolle des Blindwertes

8. Kalibration

Bei Außerkontrollsituationen mindestens aber einmal jährlich muss neu Kalibriert werden. Dazu werden aus den gesamten Stammlösungen folgende Standards hergestellt und gemessen. Nach Prüfung und Auswertung werden diese Standards dann in die bestehende Kalibrationskurve eingefügt. (1,0mg/l; 2,5,0mg/l; 10,0 mg/l; 1mg/l; 25mg/l; 50mg/l;)

9. QS-Maßnahmen

Jährlich

- Kalibration

Arbeitstäglich

- Messung von zwei definierten Arbeitsstandards (1mg/l und 10mg/l +- 10%), jeweils am Anfang und am Ende jeder Sequenz, bei großen Serien zusätzlich nach jeder 20. Probe. Jeweils eine Kontrolle beider Konzentrationen pro Serie wird in die Kontrollkarten eingetragen. Einer Sichtkontrolle werden alle Kontrollen unterzogen.

Labor Dr.Freytag&Partner	Arbeitsanweisung	Datum: 15.02.16 Seite: 3 von 3
	Bestimmung der gelösten Anionen Fluorid, Chlorid, Nitrit, Orthophosphat, Bromid, Nitrat und Sulfat mittels Ionenchromatographie	

- Messen eines Arbeitsstandards 50 mg/l einmal täglich
- Messung eines Blindwertes
- Führen von Kontrollkarten
- Führen einer Gerätekarte

Außerkontrollsituation

Überprüfen der Reagenzien, der Standards sowie der Geräteparameter

Bei wiederholter Abweichung der Kontrollstandards eine neue Kalibration erstellen.

10. Mitgeltende Dokumente

- Handbuch IC
- DIN EN ISO 10304-1 D19 1995-04
- DIN EN ISO 10304-2 D20 1996-11
- DIN EN ISO 10304-1 D20
- Führen von Kontrollzielkarten
- Gerätebuch IC