



Technische Universität Wien
Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft



Federal Environment Agency – Austria

STOFFFLUSSANALYSE UND VERGLEICH ZWEIER AUFBEREITUNGSTECHNIKEN FÜR BAURESTMASSEN

Elisabeth Schachermayer
Theresia Lahner
Paul H. Brunner

Unterstützt durch:
Österreichischer Baustoffrecyclingverband
Amt der Salzburger Landesregierung

MONOGRAPHIEN
Band 99

M-099

Wien, 1998

Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie



Projektleitung UBA

Mag. Dr. Andrea Hanus-Illnar
Dipl.-Ing. Isabella Kossina

Projektleitung

Dipl.-Ing. Dr. Elisabeth Schachermayer

Übersetzung

Ulrike Stärk

Satz/Layout

Elisabeth Lössl

Titelphoto

Baurestmassensortieranlage der Firma Deisl Beton Ges.m.b.H. am Standort Sulzau-Kehlgraben (E. Schachermayer)

Impressum

Medieninhaber und Herausgeber: Umweltbundesamt (Federal Environment Agency)
Spittelauer Lände 5, A-1090 Wien (Vienna), Austria

Druck: Riegelnik, 1080 Wien

© Umweltbundesamt, Wien, 1998
Alle Rechte vorbehalten (all rights reserved)
ISBN 3-85457-437-1

Kurzfassung

Ziel des Projektes STOVAUF ist es, Güter und Stoffe einer *nassen* Baurestmassensortieranlage zu bilanzieren, deren Eingangsmaterial gemäß der Trennverordnung für Baurestmassen gewonnen wird und dementsprechend gering verunreinigt ist. Insbesondere soll untersucht werden, wie die Eingangsmaterialien Bauschutt und Betonabbruch auf die Sortierfraktionen aufgeteilt werden, und ob und wie diese Verteilung vom Eingangsmaterial abhängt. Weiters soll überprüft werden, ob die Sortierfraktionen dieser Anlage die Qualitätskriterien für Bodenaushub- bzw. Baurestmassendeponien erfüllen.

Die Bilanzen werden mit dem Instrument der Stoffflußanalyse erstellt; als Stoffe wurden Aluminium (Al), Chrom (Cr), Eisen (Fe), Kupfer (Cu), Zink (Zn), Cadmium (Cd), Quecksilber (Hg), Blei (Pb), Schwefel (S) und Gesamtchlor (Cl) ausgewählt. Die Güterflüsse werden direkt auf der Anlage gemessen. Um die einzelnen Güter vor Ort repräsentativ beproben zu können, wird in einem Vorversuch die Methode der Probenahme (Zeitpunkt, Anzahl und Umfang der Proben, Probenahmestellen) festgelegt und in zwei Hauptversuchen nach diesem Schema angewandt. Die Stoffkonzentrationen in allen Sortierfraktionen werden durch das Umweltbundesamt gemessen. Aus den Güterflüssen und den Stoffkonzentrationen lassen sich die Stoffflüsse durch die Anlage berechnen.

Die chemische Zusammensetzung der Eingangsmaterialien wird aus deren Massenflüssen und den berechneten Stoffflüssen bestimmt. Die Ergebnisse des Vorversuches und der beiden Hauptversuche belegen, daß die wiederverwertbaren Fraktionen (rund 90 Gewichtsprozent des Eingangsmaterials) der nassen Anlage eine sehr geringe Belastung mit Schwermetallen aufweisen; sie erfüllen ausnahmslos die Anforderungen der Richtlinien für Recyclingbaustoffe und entsprechen ebenso den Qualitätskriterien für Bodenaushubdeponien. Die nicht verwertbaren Sortierfraktionen Leichtgut und Abwassersediment (rund 10 Gewichtsprozent des Eingangsmaterials) überschreiten jedoch die Grenzwerte für organischen Kohlenstoff (mit Ausnahme des Abwassersedimentes aus der Aufbereitung von Betonabbruch) für Bodenaushub- und Baurestmassendeponie. Die Grenzwerte für Quecksilber werden vom Abwassersediment aus der Aufbereitung von Bauschutt in Einzelfällen überschritten. Diese beiden Sortierfraktionen werden derzeit abgelagert. Es wird empfohlen, das Leichtgut thermisch zu verwerten und das Abwassersediment zu verfestigen.

Alle Versuche zeigen, daß organischer Kohlenstoff in der Leichtfraktion angereichert wird und Eisen im Eisenschrott. Als allgemeine Tendenz wurde eine Anreicherung von Schwermetallen im Abwassersediment festgestellt.

Ein Vergleich der Ergebnisse mit Arbeiten über *trockene* Aufbereitungsverfahren zeigt, daß prinzipiell beide Verfahren geeignet sind, bezüglich der stofflichen Qualität hochwertige mineralische Fraktionen zu produzieren. Sowohl der Literaturvergleich als auch die eigenen Untersuchungen belegen allerdings, daß die wichtigste Grundlage hierfür ein „sauberes“ Eingangsmaterial ist, da weder nasse noch trockene Verfahren in der Lage sind, *gezielt* die stoffliche Qualität der Sortierprodukte zu verbessern. Daraus läßt sich folgern, daß für ein erfolgreiches Recycling von Baurestmassen die bestmögliche Trennung beim Abbruch auf der Baustelle (selektiver Rückbau) notwendig ist.

Material flow analysis and comparison of two treatment techniques for construction and demolition waste – Summary

The aim of this project was to determine the material flow of a wet construction waste sorting plant. Incoming wastes are sorted according to the ordinance on the separation of construction waste, which reduces impurities to a minimum. Particular attention was paid to the shares of rubble and concrete debris in the various sorting fractions and to whether or not or in which way this distribution depends on the composition of the incoming wastes. The second aim was to assess whether or not the sorting fractions of this plant meet the quality criteria for the disposal of excavation material and construction and demolition waste, respectively.

The material balances were established by means of substance flow analysis, the investigated elements being aluminium (Al), chromium (Cr), iron (Fe), copper (Cu), zinc (Zn), cadmium (Cd), mercury (Hg), lead (Pb), sulphur (S), and total chlorine (Cl). Mass flows were measured directly at the plant. In order to get representative samples, preliminary tests were carried out to determine the sampling methodology (point in time, number and size of samples, sampling points), which was applied in two main tests. The pollutant concentrations in all sorting fractions were measured by the Austrian Federal Environment Agency. On the basis of mass flow data and substance concentrations the mass flows through the plant can be calculated.

The chemical composition of incoming wastes is determined by their mass flows and the calculated substance flows. The results of the preliminary test and of the two main tests show that the reusable fractions (about 90 weight percent of the incoming waste) of the wet treatment plant show a very low heavy metal loading; without exception, they all correspond to the requirements of the guidelines for recycled building materials and meet the quality criteria for excavation material disposal sites. However, the sorting fractions which cannot be reused, i.e. light weight material and waste water sediment, (about 10 weight percent of the incoming waste) exceed the limits values for organic carbon, for soil excavation and construction waste disposal sites, with waste water sediments from the treatment of concrete debris being the only exception to the rule. In individual cases the limit values for mercury are exceeded in waste water sediment from the treatment of building rubble. At present, both sorting fractions are landfilled. It is recommended to subject the fraction of light weight material to thermal treatment; waste water sediment should be stabilised.

All tests show that organic carbon accumulates in the light fraction, iron in scrap iron. Heavy metals generally tended to accumulate in waste water sediment.

A comparison of this project's results with studies on *dry* treatment techniques shows that, in general, both processes are suitable to produce high-quality mineral fractions. In either case, a "clean" initial material is the most important prerequisite. This has been confirmed by relevant literature and the results of this project. Since neither wet nor dry processes are capable of directly improving the quality of the sorting products, successful recycling of construction and demolition waste requires the best possible separation of selected materials on the demolition site (selective demolition).

INHALT

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | EINLEITUNG | 7 |
| 2 | ZIELSETZUNG | 9 |
| 3 | FRAGESTELLUNGEN | 9 |
| 4 | METHODIK UND VORGEHEN | 10 |
| 4.1 | Auswahl der Indikatorelemente | 11 |
| 4.2 | Beschreibung der Anlage | 12 |
| 4.3 | Massenbilanz der Anlage nach Angaben der Betreiber | 14 |
| 5 | VORVERSUCH ZUR ERSTELLUNG EINER STOFFFLUSSANALYSE DER ANLAGE | 16 |
| 5.1 | Güterflüsse des Vorversuches | 16 |
| 5.1.1 | Durchführung der Messungen und Berechnungen..... | 16 |
| 5.1.2 | Ergebnisse | 17 |
| 5.1.3 | Vergleich der Massenbilanz nach Angaben der Betreiber mit den Ergebnissen des Vorversuches | 19 |
| 5.2 | Zusammensetzung der Produkte der Anlage | 19 |
| 5.2.1 | Probenahme für die Bestimmung der Stoffgehalte..... | 19 |
| 5.2.2 | Probenaufbereitung und Analytik..... | 20 |
| 5.2.3 | Auswertung der Analysenergebnisse..... | 21 |
| 5.3 | Verteilung der Stoffe bei der Aufbereitung und Berechnung der Inputzusammensetzung | 23 |
| 5.3.1 | Stoffflüsse..... | 23 |
| 5.3.2 | Berechnete Zusammensetzung des Inputs..... | 24 |
| 5.3.3 | Transferkoeffizienten | 25 |
| 5.3.4 | Anreicherung | 26 |
| 5.4 | Folgerungen aus dem Vorversuch | 27 |
| 6 | ERSTER HAUPTVERSUCH ZUR ERSTELLUNG EINER STOFFFLUSSANALYSE DER ANLAGE | 28 |
| 6.1 | Güterflüsse des Hauptversuches | 28 |
| 6.1.1 | Durchführung der Messungen | 28 |
| 6.1.2 | Ergebnisse | 28 |
| 6.2 | Zusammensetzung der Produkte der Anlage (Hauptversuch 1) | 29 |
| 6.3 | Verteilung der Stoffe bei der Aufbereitung und Berechnung der Inputzusammensetzung | 31 |
| 6.3.1 | Stoffflüsse..... | 31 |
| 6.3.2 | Berechnete Zusammensetzung des Inputs..... | 32 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 6.3.3 | Transferkoeffizienten | 34 |
| 6.3.4 | Anreicherung | 35 |
| 7 | ZWEITER HAUPTVERSUCH ZUR VERIFIZIERUNG DER BISHERIGEN ERGEBNISSE | 37 |
| 7.1 | Güterflüsse des zweiten Hauptversuches | 37 |
| 7.1.1 | Durchführung der Messungen | 37 |
| 7.1.2 | Ergebnisse | 37 |
| 7.2 | Zusammensetzung der Produkte der Anlage (Hauptversuch 2) | 38 |
| 7.3 | Verteilung der Stoffe bei der Aufbereitung und Berechnung der Inputzusammensetzung | 40 |
| 7.3.1 | Stoffflüsse | 40 |
| 7.3.2 | Berechnete Zusammensetzung des Inputs | 41 |
| 7.3.3 | Transferkoeffizienten | 43 |
| 7.3.4 | Anreicherung | 45 |
| 8 | VERGLEICH DER ERGEBNISSE MIT ARBEITEN ÜBER TROCKENE AUFBEREITUNGSVERFAHREN | 47 |
| 8.1 | Möglichkeiten zur Verbesserung der Umweltverträglichkeit aufbereiteter Hochbaurestmassen | 47 |
| 8.2 | Stoffflußanalyse einer Bauabfallsortieranlage BASORAG | 50 |
| 8.3 | Stoffflußanalyse einer Sortieranlage für Bausperrgut SORTAG | 53 |
| 8.4 | Grundlagenuntersuchung zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Bauschutt und Baustellenabfällen | 56 |
| 8.5 | Vergleich der vorgestellten Arbeiten über trockene Verfahren mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie | 57 |
| 9 | BEANTWORTUNG DER FRAGEN | 60 |
| 10 | ZUSAMMENFASSUNG | 73 |
| 11 | LITERATUR | 80 |
| 12 | ANHANG | 81 |

1 EINLEITUNG

Laut Bundesabfallwirtschaftsplan 1995 stellen mineralischer Bauschutt, Straßenaufbruch und Bodenaushub mit rund 20 Millionen Tonnen pro Jahr einen Anteil von etwa 50 % des Gesamtabfallaufkommens in Österreich dar.

Für die zielführende Verwertung und Entsorgung der nicht vermeidbaren Baurestmassen wurde die "Verordnung über die Trennung von bei Bautätigkeiten anfallenden Materialien" (BUNDESMINISTERIUM F. UMWELT, JUGEND UND FAMILIE, 1991) erlassen. Überschreiten die Abfallgruppen im Rahmen eines Bauvorhabens die angegebenen Mengenschwellen,

- Bodenaushub 20 t
- Betonabbruch 20 t
- Asphaltaufbruch 5 t
- Holzabfälle 5 t
- Metallabfälle 2 t
- Kunststoffabfälle 2 t
- Baustellenabfälle 10 t
- mineralischer Bauschutt 40 t

so müssen sie entweder am Anfallort (Baustelle) oder in Behandlungsanlagen getrennt, und in der Folge, soweit ökologisch vorteilhaft, technisch möglich und ökonomisch sinnvoll, wiederverwertet oder anderenfalls möglichst reaktionsarm und konditioniert geordnet abgelagert werden. Bei der Ablagerung ist das im AWG¹ formulierte Ziel der nachsorgefreien Deponie zu erfüllen.

Die Forderung nach Abfallverwertung ist als ein Grundsatz im österreichischen Abfallwirtschaftsgesetz verankert. Es ist zu beachten, daß sowohl die Ziele der österreichischen Abfallwirtschaft, als auch deren Grundsätze *stofflicher*² Natur sind. Mensch und Umwelt müssen nicht vor dem Gut "Abfall" an sich geschützt werden, sondern vor den stofflichen Auswirkungen der Abfälle und ihrer Bewirtschaftung. Für die meisten der heute in Betrieb befindlichen Verwertungssysteme bestehen erst Kenntnisse auf der Güterebene und noch nicht auf der stofflichen Ebene. Dies gilt auch für Baurestmassen und die bei ihrer Aufbereitung anfallenden Produkte.

Baurestmassen sind für die Abfallwirtschaft nicht nur mengenmäßig von Bedeutung, sondern sie stellen auch ein beträchtliches stoffliches Potential dar, das es zu bewirtschaften und zu nutzen gilt. Einerseits müssen im Hinblick auf die Endlagerung in der Umwelt stoffliche Anforderungen erfüllt werden (z. B. jene der Deponieverordnung). Andererseits müssen zukünftig bei der Aufbereitung von Baurestmassen auch stoffliche Kriterien berücksichtigt werden, denn langfristig können nur solche Materialien im Kreislauf geführt werden, bei denen es auch bei mehrmaliger Wiederverwertung zu keiner Anreicherung von unerwünschten Stoffen in den Recyclingbaustoffen kommt.

Das Motiv für das vorliegende Projekt ist es daher, anhand einer Bauschutttaufbereitungsanlage Kenntnisse über die stoffliche Zusammensetzung von Baurestmassen, sowie von wiederverwertbaren und zu entsorgenden Fraktionen der Baurestmassenaufbereitung zu gewinnen und diese Informationen, verknüpft mit Daten bezüglich der Abfallmengen, in ein übergeordnetes Projektskonzept einzugliedern, im Rahmen dessen Strategien und Maßnah-

¹ AWG = österr. Abfallwirtschaftsgesetz §1

² unter einem Gut wird in der Folge immer eine handelbare Substanz verstanden, die aus Stoffen zusammengesetzt ist (z. B. Baurestmassen), unter einem Stoff ein chemisches Element oder eine chemische Verbindung (z. B. Eisen, Zellulose)

men zur Bewirtschaftung von Abfällen des Bauwesens erarbeitet werden sollen. Es ist daher die unmittelbare Anbindung an das Projekt „BRIO“ (Baurestmassen in Oberösterreich) geplant, wo in Zusammenarbeit mit dem Land Oberösterreich eine Güterbilanz des Bauwesens für Oberösterreich (Input, Output und Lagerabschätzung des Bauwesens) erstellt wird. Des Weiteren wird für ergänzende Projekte (Abb. 1-1) eine Zusammenarbeit mit Partnern aus dem Bereich der Bauindustrie angestrebt.

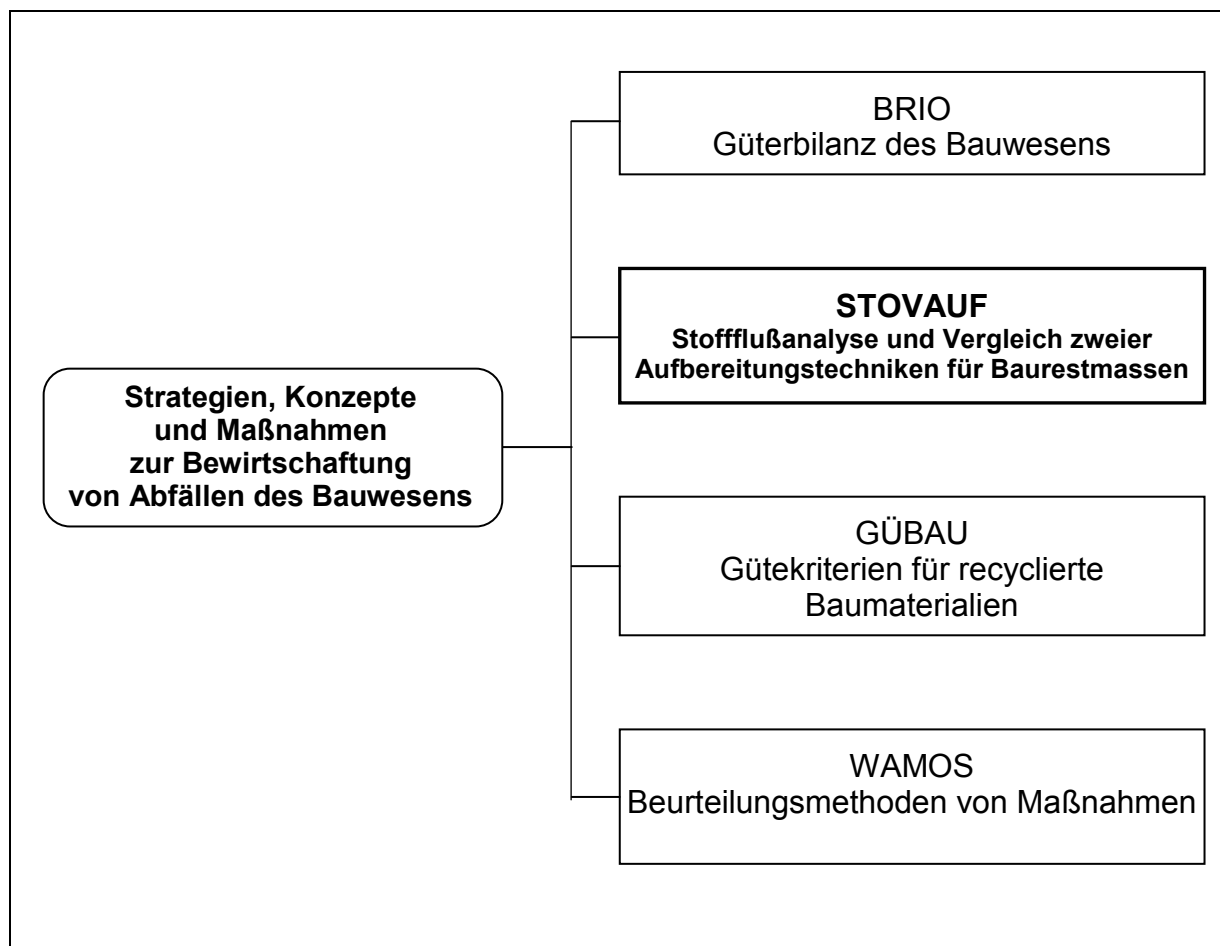


Abb. 1-1: Einordnung des Projektes "Bilanzierung und Vergleich verschiedener Aufbereitungstechniken für Baurestmassen" als Teil der Bewirtschaftung von Abfällen des Bauwesens in Zusammenhang mit anderen Projekten

| Projektname | Zielsetzung |
|-------------------|--|
| 1. BRIO | Bestimmung der Güterbilanz des Bauwesens in Oberösterreich |
| 2. STOVAUF | Stoffflußanalyse und Vergleich zweier Aufbereitungstechniken für Baurestmassen |
| 3. GÜBAU | Definition von Gütekriterien für den Güter- und Stoffeinsatz im Bauwesen |
| 4. WAMOS | Entwicklung von Methoden zur Beurteilung der Auswirkungen abfallwirtschaftlicher Maßnahmen |

2 ZIELSETZUNG

Das 1. Ziel dieses Projektes besteht darin, die stoffliche Zusammensetzung der Produkte eines nassen Aufbereitungsverfahrens für Baurestmassen zu analysieren, und daraus über eine Stoffbilanz die durchschnittliche chemische Zusammensetzung der Baurestmassen zu ermitteln. Die in der Anlage aufbereiteten Abfälle (Input, Eingangsmaterial, Edukt) sind zu heterogen, als daß mit vertretbarem Aufwand eine repräsentative Beprobung zur Bestimmung ihrer chemischen Zusammensetzung durchgeführt werden könnte. Die stoffliche Qualität der produzierten Fraktionen soll aus der Sicht der langfristigen Umweltverträglichkeit und optimalen Rohstoffnutzung, nicht aber hinsichtlich der bautechnischen Eigenschaften beurteilt werden.

Als 2. Ziel werden die Resultate der nassen Aufbereitung von Baurestmassen mit Literaturdaten von trockenen Aufbereitungsverfahren bezüglich der Verteilung der Güter und Stoffe auf die einzelnen Fraktionen verglichen.

3 FRAGESTELLUNGEN

Um die oben genannten Ziele zu erreichen, ist es notwendig, folgende Fragen zu beantworten:

- Welche Produkte entstehen bei der nassen Aufbereitung im Jahresschnitt und bei der Beprobung?
- Wie sieht die Massenbilanz der untersuchten Anlage während eines Jahres und während des Beprobungszeitraumes aus?
- Wie verteilen sich ausgewählte Stoffe bei der nassen Aufbereitung während des Beprobungszeitraumes?
- Welche Zusammensetzung der Baurestmassen läßt sich aus den Produkten der nassen Sortierung berechnen?
- Wie werden Stoffe in den Produkten der nassen Aufbereitung angereichert bzw. vermindert?
- Wie wird die stoffliche Qualität der Produkte der nassen Aufbereitung durch das Inputmaterial beeinflusst?
- Existiert eine Sensitivität der Transferkoeffizienten bezüglich der Edukte für die untersuchte Anlage?
- Sind die nicht verwertbaren Produkte der nassen Aufbereitung für eine Ablagerung gemäß Deponieverordnung geeignet, und wenn nicht, welche Vorbehandlung ist notwendig?
- Sind der Recycelbarkeit aus ökologischer Sicht Grenzen gesetzt?
- Wo liegen die wesentlichen Unterschiede zwischen nassen und trockenen Behandlungsverfahren?

4 METHODIK UND VORGEHEN

Zur Erstellung der Güter- und Stoffbilanz des untersuchten, nassen Aufbereitungsverfahrens für Baurestmassen wird die Methodik der Stoffflußanalyse angewandt. Diese Methodik dient der umfassenden Beschreibung und Beurteilung der Material- und Stoffströme eines Systems, wobei nicht primär der einzelne Prozeß, sondern das System als Ganzes im Vordergrund steht. In der vorliegenden Arbeit wird zunächst das System "nasse Aufbereitung", enthaltend alle Subprozesse, Güter, Güterflüsse und Lager definiert (siehe Abb. 4-1).

Die Anlage wird insgesamt dreimal beprobt. Die erste Beprobung, der „Vorversuch“, soll Aufschluß über die stoffliche Homogenität der Outputfraktionen geben. Basierend auf den Ergebnissen des Vorversuches wird ein Probenahmeplan zur repräsentativen Beprobung (Hauptversuch 1 und 2) der Aufbereitungsanlage ausgearbeitet. Die beiden Hauptversuche sollen Ergebnisse bezüglich der stofflichen Zusammensetzung der Outputfraktionen unterschiedlicher Edukte, nämlich **Bauschutt und Betonabbruch** gemäß Trennverordnung (BUNDESMINISTERIUM F. UMWELT, JUGEND UND FAMILIE, 1991), zu unterschiedlichen Zeitpunkten liefern. Um die Bandbreite der Ergebnisse besser absichern zu können, werden in beiden Hauptversuchen sowohl die Produkte der Bauschutt-, als auch diejenigen der Betonabbruchaufbereitung beprobt. Zusätzlich soll festgestellt werden, ob die Verteilung der in den Baurestmassen enthaltenen Elemente bei der Aufbereitung vom Inputmaterial abhängt oder nicht.

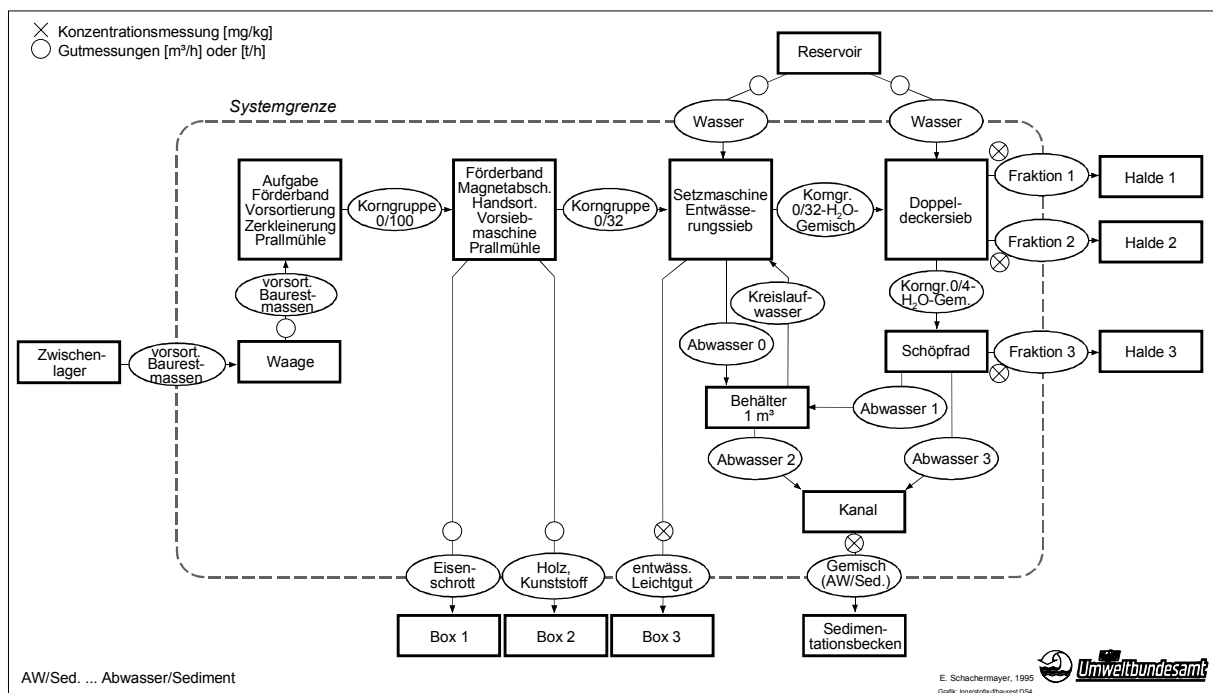


Abb. 4-1: Systemdefinition der Sortier- und Aufbereitungsanlage von Baurestmassen

Tab. 4-1: Schema der Beprobung der Anlage

| | Vorversuch | Hauptversuch 1 (a + b) | Hauptversuch 2 (a + b) |
|--------------------------------|--|---|---|
| Datum der Probenahme | 14/15.11 1995 | 21.5.1996 | 8.4.1997 |
| Eingangsmaterialien | vorsortierter Bauschutt | 1a vorsortierter Bauschutt 1b Betonabbruch | 2a vorsortierter Bauschutt 2b Betonabbruch |
| Beprobte Güter | Fraktion 1 (Korngrößen 16-32 mm) Fraktion 2 (Korngrößen 4-16 mm) Fraktion 3 (Korngrößen 0-4 mm) Leichtgut Abwasser Abwassersediment | | |
| Anzahl der Mischproben pro Gut | 5 | 5 bzw.1 (für Leichtgut bei den Versuchen 1b und 2b) | |
| Probengröße pro Mischprobe | rund 4 kg | | |

Bei jedem der drei Versuche werden die relevanten Güterflüsse durch die nasse Aufbereitung über einen bestimmten Zeitraum gemessen und die gesamten Outputs beprobt. Die Konzentrationen der Indikatorstoffe werden analysiert und durch die Verknüpfung der Güterflüsse mit den Stoffkonzentrationen die Stoffflüsse berechnet. Mit mathematisch-statistischen Methoden werden die Bilanzen ermittelt, optimiert und auf ihre Aussagekraft überprüft.

Die gewählte Methodik der Stoffflußanalyse erlaubt aber nicht nur Aussagen über die Zusammensetzung der angelieferten Baurestmassen, sondern sie gibt auch Auskunft darüber, wie effizient die verschiedenen Materialien in der Anlage getrennt werden können. Es kann gezeigt werden, in welchen Fraktionen eine Anreicherung bzw. Abminderung der verschiedenen Elemente erfolgt, und welche Verwertungs- und Entsorgungswege für die jeweiligen Fraktionen offenstehen.

4.1 Auswahl der Indikatorelemente

Für die Untersuchungen wurden Elemente ausgewählt, deren Konzentrationen in unterschiedlichen Verordnungen, die auch Baurestmassen betreffen können, begrenzt werden. Für den Fall der Ablagerung des Materials in einer Deponie müssen die Grenzwerte der Deponieverordnung (Verordnung des Bundesministers für Umwelt über die Ablagerung von Abfällen BGBl 1996/164) eingehalten werden. Für eine potentielle Einleitung des Abwassers der Aufbereitungsanlage in ein Fließgewässer sind die Begrenzungen der allgemeinen Abwasseremissionsverordnung zu berücksichtigen (Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft über die allgemeine Begrenzung von Abwasseremissionen in Fließgewässer und öffentliche Kanalisationen "Allgemeine Abwasseremissionsverordnung, AAEV", BGBl 1996/186).

Folgende Stoffe wurden ausgewählt:

Aluminium (Al), Chrom (Cr), Eisen (Fe), Kupfer (Cu), Zink (Zn), Cadmium (Cd), Quecksilber (Hg), Blei (Pb), Schwefel (S) und Gesamtchlor (Cl).

Zusätzlich wurden organischer Kohlenstoff und die Matrixelemente Silizium und Kalzium bestimmt, da das Langzeitverhalten vorwiegend mineralischer Materialien sowohl bei der Verwendung als Baustoffe als auch auf Deponien hauptsächlich von den Hauptkomponenten bestimmt wird.

Tab. 4-2: Darstellung von in der Deponieverordnung bzw. in der Allgemeinen Abwasseremissionsverordnung begrenzten elementaren Konzentrationen

| Element | Deponieverordnung 1996 | Allg. Abwasseremissionsverordnung 1996 | |
|------------------|--|--|--|
| | Grenzwerte für Gesamtgehalte Bodenaushubdeponie/ Baurestmassendeponie [mg/kgTS] | Emissionsbegrenzung | |
| | | Anforderung an Einleitungen in ein Fließgewässer | Anforderungen an Einleitungen in eine öffentliche Kanalisation |
| | | [mg/l] | |
| Kohlenstoff org. | 20.000/30.000 | 25 | - |
| Aluminium | -/- | 2 | durch absetzbare Stoffe begrenzt |
| Chrom | 300/500 | 0,5 | 0,5 |
| Eisen | -/- | 2,0 | durch absetzbare Stoffe begrenzt |
| Kupfer | 100/500 | 0,5 | 0,5 |
| Zink | 500/1.500 | 2,0 | 2,0 |
| Cadmium | 2/10 | 0,1 | 0,1 |
| Quecksilber | 1/3 | 0,01 | 0,01 |
| Blei | 150/500 | 0,5 | 0,5 |
| Nickel | 100/500 | 0,5 | 0,5 |
| Kobalt | 50/100 | 1,0 | 1,0 |
| Arsen | 50/200 | 0,1 | 0,1 |
| Gesamtchlor | - | 0,4 | 0,4 |
| Sulfat | - | im Bedarfsfall festzulegen | 200* |

*... im Einzelfall nach Baustoffen und Mischungsverhältnissen im Kanal höhere Werte zulässig

4.2 Beschreibung der Anlage

Die Baurestmassensortieranlage der Firma Deisl Beton Ges.m.b.H. am Standort Sulzau-Kehlgraben ist Bestandteil eines Sand- und Kieswaschwerkes. Dies hat den Vorteil, daß bereits vorhandene Betriebseinrichtungen wie beispielsweise eine Brückenwaage, diverse Zerkleinerungs- und Siebvorrichtungen etc. mitbenutzt und somit Kosten eingespart werden können; außerdem wird mit der Kombination von Naturmaterial- und Baurestmassenaufbereitung eine gute Auslastung der Anlage gewährleistet. Die Besonderheit dieser Sortieranlage besteht darin, daß zu den auch auf anderen Anlagen üblichen Sortier- und Zerkleinerungsprozessen ein nasser Aufbereitungsschritt in einer Setzmaschine hinzukommt, welcher ursprünglich für die Reinigung von stark verschmutztem, lehm- und schluffreichem Schottermaterial vorgesehen war.

Die jährliche Betriebsdauer der Anlage ist von den Wetterverhältnissen abhängig und erstreckt sich normalerweise von Mitte März bis Mitte Dezember. Die Anlage ist 40 Wochen, bzw. 2000 Stunden im Jahr und demzufolge 50 Stunden/Woche in Betrieb. Im Schnitt werden wöchentlich abwechselnd zwei Tage Baurestmassen und vier Tage Naturmaterialien aufbereitet.

Der Input in die Anlage beträgt 300.000 t/a bzw. 150 t/h; er besteht zu rund 75 % (225.000 t/a) aus Naturmaterial und zu rund 25 % (75.000 t/a) aus Baurestmassen. Der Wasserbedarf zur Aufbereitung einer Tonne Naturmaterial wird von der Betriebsleitung mit 0,5 m³, derjenige für Baurestmassen mit 1 bis 2 m³ pro Tonne Material angegeben. Der jährliche Wasserbedarf beträgt nach diesen Angaben rund 190.000 m³.

In der vorliegenden Arbeit wird ausschließlich die *Aufbereitung der mineralischen Baurestmassen* untersucht. Das auf der beschriebenen Anlage aufbereitete Material besteht aus Betonabbruch und Bauschutt; es wird unter Einhaltung der "Verordnung über die Trennung von bei Bautätigkeiten anfallenden Materialien" (BUNDESMINISTERIUM F. UMWELT, JUGEND UND FAMILIE, 1991) am Ort des Abbruchs gewonnen, wobei Mitarbeiter der Sortieranlage die konsequente Trennung am Anfallort beratend begleiten.

Nach Anlieferung auf der Sortieranlage werden der Betonabbruch bzw. der Bauschutt zunächst auf einer Brückenwaage verwogen und dann, nach Aussortieren von großen Holz- und Metallteilen, je nach Zusammensetzung, vier Zwischenlagerboxen zugewiesen. Diese Boxen mit einem Fassungsvermögen von insgesamt rund 2.000 t sind vorgesehen für

- reinen Betonabbruch
- stark armierten Betonabbruch
- vorsortierten Bauschutt mit maximaler Kantenlänge von 400-500 mm
- bzw. Bauschutt mit größerem Stückgut.

Im Folgenden werden die einzelnen Behandlungsschritte beschrieben und für die Erstellung einer Systemdefinition zu insgesamt sieben Prozessen zusammengefaßt. Zum Zweck der Massenerfassung wurde für die vom Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, Abteilung Abfallwirtschaft durchgeführten Versuche das zur Aufbereitung bestimmte Material auf einen LKW verladen, gewogen und anschließend zum Aufgabebunker transportiert. Dieser ist so dimensioniert, daß eine Aufgabe direkt vom LKW möglich ist. Am Bunkerauslauf befindet sich eine Aufgaberinne, über die das Material einem Vorsortierer mit Vermahlung zugeführt wird, welcher Stücke mit einer Kantenlänge >600 mm entfernt. Diese Stücke werden zerkleinert, wieder zurückgeführt und gemeinsam mit dem restlichen Material in einer Prallmühle auf die Korngruppe 0/100 (Korngröße 0 bis 100 mm) vereinheitlicht. In der Systemdefinition (Abb. 4-1) werden diese Aufbereitungsschritte zusammengefaßt und als **Prozeß 1** bezeichnet.

Bevor das zerkleinerte Material über ein Förderband in das Vorsieb gelangt, wird über einen Magnetabscheider der Schrott abgetrennt, anschließend werden Holz und Plastik händisch aussortiert. Das Vorsieb trennt die Korngruppe 0/100 in die Fraktionen 0/32 (Korngröße 0 bis 32 mm) und 32/100 (Korngröße 32 bis 100 mm), wobei letztere nach Zerkleinerung in einer weiteren Prallmühle wieder der Aufgaberinne vor dem Magnetabscheider zugeführt wird. Diese Aufbereitungsschritte werden in der Systemdefinition (Abb. 4-1) als **Prozeß 2** bezeichnet.

Die Korngruppe 0/32 gelangt nun in die Setzmaschine, die als Herzstück der Recyclinganlage bezeichnet werden kann. Die Sortierung erfolgt dadurch, daß die Materialschicht pulsierend von Wasser durchströmt und in einen aufgelockerten, wirbelschichtähnlichen Zustand versetzt wird. Dabei vollzieht sich eine Schichtung der Körner nach der Dichte, das heißt, leichte Körner gelangen an die Oberfläche des Materialbettes, spezifisch schwere Körner reichern sich im unteren Teil des Bettes an. Die für eine saubere Schichtung erforderliche optimale Wasserbewegung ist in erster Linie abhängig von der gewichts- und körnungsmäßigen Zusammensetzung des Aufgabegutes. Der nächste Schritt ist das sogenannte Austragen, das heißt die Abtrennung des Schwergutes aus dem nach Dichte geschichteten Materialbett. Zum Abtasten der Schwergutschicht dient ein Schwimmer, dessen Signale elektronisch verarbeitet werden, wodurch eine verzögerungsfreie Arbeitsweise der Austragsregelung sichergestellt wird. Das "Schwergut" (Korngruppe 0/32) wird über eine Zellradschleuse direkt der Doppeldeckersiebmaschine zugeleitet. Das "Leichtgut", hauptsächlich bestehend aus kleinen Stücken von Holz, Kunststoff, Isolier- und Installationsmaterial, Gips etc., gelangt

in ein Entwässerungssieb und wird nach Abtrennung des Wassers in einer Box zwischengelagert. Setzmaschine und Entwässerungssieb erscheinen in der Systemdefinition (Abb. 4-1) als **Prozeß 3**.

Das von der Setzmaschine kommende Materialwassergemisch wird der Doppeldeckersiebmaschine - in der folgenden Abbildung als **Prozeß 4** bezeichnet - zugeleitet, dort nachgewaschen und in die Korngruppen 16/32, bezeichnet als Fraktion 1, 4/16, bezeichnet als Fraktion 2 und 0/4, bezeichnet als Fraktion 3, aufgeteilt. Die Fraktionen 1 und 2 werden über Schurren und Rutschen der jeweiligen Halde zugeleitet, während das verbleibende Materialwassergemisch zunächst in einem Schöpfrad (**Prozeß 5**) entwässert wird und schließlich auf der zugehörigen Halde aufgeschüttet wird.

Die Fraktionen 1, 2 und 3 werden zur Herstellung von neuen Baumaterialien recycelt, während alle anderen Outputfraktionen zur Zeit nicht wiederverwendet werden können.

Das Abwasser aus der Setzmaschine und aus dem Doppeldeckersieb gelangt über einen 1 m³ großen Behälter (**Prozeß 6**) gemeinsam durch einen Kanal (**Prozeß 7**) in ein Sedimentationsbecken mit der Oberfläche von ca. 1 ha, in welchem sich das Abwassersediment absetzt und das Wasser verdunstet bzw. versickert.

4.3 Massenbilanz der Anlage nach Angaben der Betreiber

Um einen ersten Eindruck von der Größe der im Zeitraum eines Jahres durch die Sortier- und Aufbereitungsanlage von Baurestmassen fließenden Güterströme zu bekommen, wurde eine Massenbilanz, basierend auf mündlichen Mitteilungen der Anlagenleitung, erstellt. Folgende Güter wurden dabei berücksichtigt:

Inputgüter (siehe Abb. 4-1):

- **Baurestmassen:** Betonabbruch bzw. vorsortierter Bauschutt
- **Wasser:** Oberflächen- und Grundwasser

Outputgüter (siehe Abb. 4-1):

- **Eisenschrott:** händisch oder über den Magnetabscheider entferntes Eisen
- **Holz und Kunststoff:** händisch aussortiertes Material
- **entwässertes Leichtgut:** Outputgut der Setzmaschine, bestehend aus kleinen Stücken von Holz, Kunststoff, Isolier- und Installationsmaterial, Gips etc.
- **Fraktion 1:** Material mit Korngrößen von 16-32 mm
- **Fraktion 2:** Material mit Korngrößen von 4-16 mm
- **Fraktion 3:** Material mit Korngrößen von 0-4 mm
- **Abwasser 4:** die flüssige Phase ohne Feststoffe
- **Abwassersediment:** die mit dem Abwasser transportierten Feststoffe (in Abb. 4-1 nicht aufgeführt).

Während die Massenerfassung der in der Anlage angelieferten und aufbereiteten Baurestmassen gut dokumentiert ist, sind die Angaben über den Wasserbedarf mit großer Unsicherheit behaftet. Letzterer wird nicht direkt gemessen, sondern über die maximale Fördermenge der beiden Zulaufpumpen abgeschätzt. Entsprechend den Angaben der Betreiber liegt der Wasserbedarf zwischen 1-2 m³ pro Tonne aufbereitetem Material. Dies bedeutet für die Güterbilanz große Unsicherheit auch für das Outputgut „Abwasser“, während die Angaben über die anderen Outputgüter wesentlich geringere Bandbreiten aufweisen.

Die Menge der jährlich angelieferten Baurestmassen beläuft sich auf rund 75.000 Tonnen. Davon sind laut mündlicher Mitteilung der Betriebsleitung 15-20 % nicht verwertbar; sie bestehen hauptsächlich aus Metall, Holz und Kunststoffen und werden vor der Lagerung der Materialien aussortiert. Die verbleibenden **vorsortierten Baurestmassen** (63.750 bis 67.500 Tonnen pro Jahr) **gelangen in die Aufbereitung**, bei der jeweils rund 25 Masse % (bzw. 16.000 bis 17.000 Tonnen pro Jahr) als Fraktion 1 (Korngruppe 16-32) und Fraktion 2 (Korngruppe 4-16) und rund 35 Masse % (bzw. 22.000 bis 24.000 Tonnen pro Jahr) als Fraktion 3 (Korngruppe 0-4) anfallen. 10-15 Masse % (bzw. rund 8.000 bis 8.400 Tonnen pro Jahr) des aufbereiteten Materials befinden sich als Abwassersediment im Abwasser, jeweils rund 1 Masse % (bzw. 640 bis 680 Tonnen pro Jahr) fällt als Leichtgut bzw. Eisenschrott an. Holz und Kunststoff betragen rund 0,5 Masse % (bzw. 320 bis 340 Tonnen pro Jahr) des Inputs. Diese Güterbilanz nach Angabe der Betreiber ist in Abb. 4-2 dargestellt.

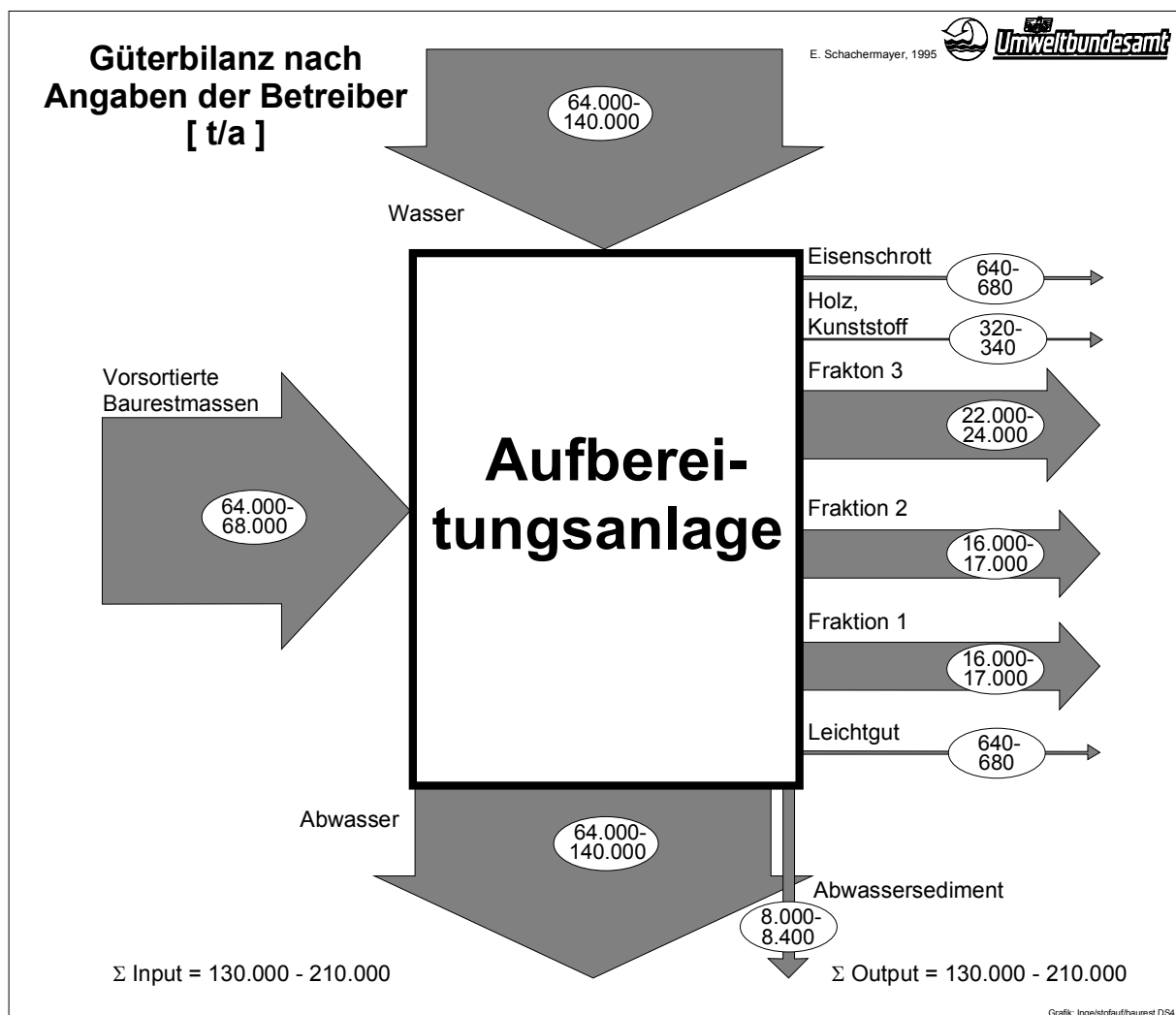


Abb. 4-2: Güterbilanz der Sortier- und Aufbereitungsanlage von Baurestmassen nach Angaben der Betreiber

5 VORVERSUCH ZUR ERSTELLUNG EINER STOFFFLUSS-ANALYSE DER ANLAGE

Der Vorversuch sollte Ergebnisse über die Schwankungsbreiten der einzelnen untersuchten Elemente in den Outputfraktionen liefern und somit als Basis für die Berechnung der optimalen Probenanzahl für die zwei weiteren geplanten Beprobungen (Hauptversuche 1 und 2) dienen.

Die Setzmaschine (Prozeß 3) wurde vor Versuchsbeginn entleert und ca. 30 Minuten mit Reinwasser gespült um zu gewährleisten, daß die Stoffkonzentrationen im Abwasser tatsächlich nur vom aktuellen Input stammen. Der Vorversuch dauerte 60 Minuten. Während dieser Zeit wurde die Aufbereitungsanlage mit vorsortiertem Bauschutt beschickt und unter üblichen Betriebsbedingungen gefahren.

5.1 Güterflüsse des Vorversuches

Für den Vorversuch wurden, abgesehen vom Input, welcher aus vorsortiertem Bauschutt mit maximaler Kantenlänge von 400-500 mm bestand, die gleichen Güter beprobt, die in der Güterbilanz nach Angaben der Betreiber angeführt wurden. In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die Massen der Inputgüter Wasser und vorsortierter Bauschutt und die Massen der Outputgüter Fraktion 1 (Korngruppe 16/32), Fraktion 2 (Korngruppe 4/16) und Fraktion 3 (Korngruppe 0/4), sowie Leichtgut, Holz, Eisenschrott, Abwasser und Abwassersediment gemessen bzw. abgeschätzt wurden. Schwierigkeiten die sich dabei ergaben werden dargestellt. Mit den Ergebnissen werden die Güterflüsse der Sortier- und Aufbereitungsanlage von Baurestmassen über den Versuchszeitraum berechnet.

5.1.1 Durchführung der Messungen und Berechnungen

Die Massen des Inputgutes vorsortierter Bauschutt und der Outputgüter Fraktion 1, 2 und 3 sowie von Leichtgut und Schrott, wurden über Wägungen auf der Brückenwaage mit einer Meßgenauigkeit von ± 50 kg pro Wägevorgang bestimmt. Es zeigte sich, daß bei der Gültigkeit dieses Genauigkeitsbereiches die Unsicherheit der Schätzung der Gesamtmasse der Hauptfraktionen unterhalb von 1 % liegt. Es wurde daher mit **einem** Massewert gerechnet.

Der **Input** wurde pro LKW jeweils vor der Aufgabe auf die Anlage gewogen, die **Outputfraktionen** wurden nach Ablauf der Versuchszeit jeweils auf einen LKW verladen und ebenfalls gewogen. Die Massen von Holz und Kunststoff wurden mittels einer elektrischen Handwaage (Meßgenauigkeit ± 1 g pro Wägevorgang) bestimmt.

Für das Inputgut „Wasser“ konnte der Massenstrom in Ermangelung einer Meßvorrichtung nicht ermittelt werden. Die eingesetzte Wassermenge mußte deshalb über die ermittelte Abwassermasse und den Wassergehalt der Produkte rückgerechnet werden.

Das Outputgut „Abwasser 4“ wurde über die Bestimmung der Abstandsgeschwindigkeit an der Abwasseroberfläche (Einbringen von Schwimmkörpern) und der Füllhöhe bzw. der durchströmten Querschnittsfläche im Abflußrohr (Nenndurchmesser 400 mm) berechnet. In erster Näherung wurde dabei die Abstandsgeschwindigkeit der Fließgeschwindigkeit gleichgesetzt. Gemessen wurden dabei die Distanz zweier Meßstellen im Kanalsystem und zu insgesamt fünf Zeitpunkten die Fließzeit des Abwassers zwischen diesen beiden Meßstellen. Die Füllhöhe im Abflußrohr (h) wurde ebenfalls an fünf Zeitpunkten mit Hilfe einer Meßlatte festgestellt. Aufgrund der großen Fließgeschwindigkeit im Rohr (v) und der schlechten Zugänglich-

keit der Meßstelle sind die Ablesungen mit großen Unsicherheiten behaftet. Bei der Berechnung des Volumenstroms $Q = v \cdot F$ wirken sich auch geringe Abweichungen der Füllhöhe (± 1 cm bei einer Gesamthöhe von ca. 14 cm) stark auf das Ergebnis ($\sim \pm 50$ m³/h) aus. Eine Meßungenauigkeit der Fließgeschwindigkeit von ± 1 Sekunde bewirkt eine Abweichung des Volumenstroms von ± 10 %.

Zur Berechnung der **Abwassermasse** wurde die mittlere Abstandsgeschwindigkeit der Fließgeschwindigkeit zwischen zwei Meßstellen mit der Distanz von 37,25 m gemessen; die Abstandsgeschwindigkeit betrug 3,4 m/s und der Volumenstrom des Abwassers somit 480 m³/h. Aufgrund der erwähnten Unsicherheit wurde dieser Wert in der Güterbilanz des Vorversuches mit einer Bandbreite von ± 20 % angegeben.

Die Masse des **Abwassersedimentes** wurde über den Feststoffgehalt der gezogenen Abwasserproben und der Abwassermasse berechnet. Die Abwasserproben wurden zunächst filtriert und der Filtrerrückstand getrocknet und gewogen. Aufgrund dieser Bestimmungsart wird die **Masse des Abwassersedimentes** immer als **Trockensubstanz (TS)** angegeben.

5.1.2 Ergebnisse

Die Güterbilanz des Vorversuches, welcher am 14. und 15.11.1995 in Sulzau-Kehlgraben durchgeführt wurde, ist der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Tab. 5-1: Güterflüsse des Vorversuches

| | Güterflüsse feucht [t/h] | Wassergehalt [g/100g FS] | Güterflüsse trocken [t/h] | Wasser [t/h] |
|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------|
| Inputgüter | | | | |
| vorsortierter Bauschutt | 80 | 8 | 73 | 6,7 |
| Wasser | 390-580 | - | - | 390-580 |
| Summe (gerundet) | 470-660 | - | 73 | 400-590 |
| Outputgüter | | | | |
| Eisenschrott | 0,15 | n.b. | n.b. | n.b. |
| Holz etc. | 0,06 | n.b. | n.b. | n.b. |
| Leichtgut | 1,4 | 42 | 0,8 | 0,6 |
| Abwasser (berechnet) | 380-580 | - | - | 380-580 |
| Abwassersediment (TS) | 5,8-8,6 | - | 5,8-8,6 | - |
| Fraktion 1 (16-32 mm) | 17 | 8,0 | 15 | 1,3 |
| Fraktion 2 (4-16 mm) | 29 | 8,0 | 26 | 2,4 |
| Fraktion 3 (0-4 mm) | 28 | 12 | 25 | 3,5 |
| Summe (gerundet) | 460-660 | - | 73-75 | 390-590 |

n.b. nicht bestimmt

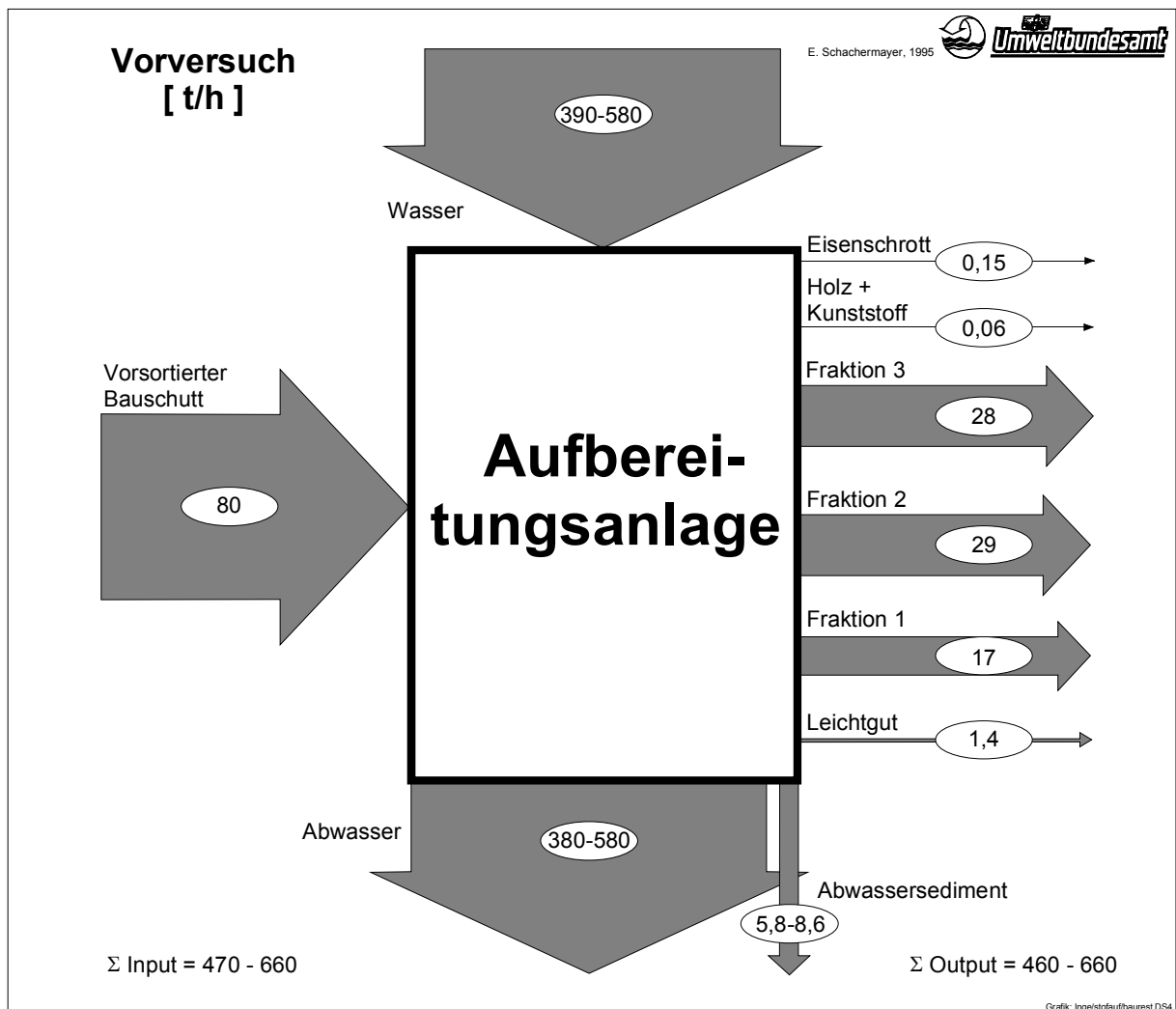


Abb. 5-1: Güterflüsse (feucht) des Vorversuches

Die Güterflüsse „feucht“ und „trocken“ weisen eine Differenz von rund 5 t/h zwischen Input und Output auf; dies ist auf die Unsicherheit der berechneten Abwassermasse und der sich daraus ergebenden Bandbreite für die Masse des Abwassersedimentes zurückzuführen.

Von 100 % vorsortiertem Bauschutt fallen nach der Aufbereitung rund 0,3 % als Holz, Schrott und Kunststoffe an, 1,7 % sind Leichtgut, 35 % bilden die Fraktion 3, 36 % die Fraktion 2 und 21 % die Fraktion 1. Der Rest befindet sich als Sediment im Abwasser. Das aufbereitete Material verteilt sich also im Vorversuch zu etwa 90 % auf die mineralischen Outputgüter Fraktion 3, Fraktion 2 und Fraktion 1.

5.1.3 Vergleich der Massenbilanz nach Angaben der Betreiber mit den Ergebnissen des Vorversuches

Tab. 5-2: Prozentuelle Verteilung des Inputs der Sortier- und Aufbereitungsanlage von Baurestmassen auf die festen Outputgüter

| | vorsortierte Baurestmassen | | Holz und Kunststoffe | Eisen-schrott | Fraktion 1 (16/32) | Fraktion 2 (4/16) | Fraktion 3 (0/4) | Leichtgut | Abwasser-sediment |
|--------------|----------------------------|-----|----------------------|---------------|--------------------|-------------------|------------------|-----------|-------------------|
| | t/h | [%] | | | | | | | |
| Jahresbilanz | 150 | 100 | 0,5 | 1 | 26 | 26 | 36 | 1 | 10-15 |
| Vorversuch | 80 | 100 | 0,06 | 0,2 | 21 | 35 | 35 | 1,7 | 7-11 |

Der Vergleich der Güterbilanzen zeigt, daß die Massenverteilung des im Vorversuch untersuchten Bauschutts ähnlich derjenigen des im Jahresschnitt aufbereiteten Materials ist. Die mineralischen Outputgüter Fraktion 1, Fraktion 2 und Fraktion 3 machen sowohl im Vorversuch als auch in der provisorischen Jahresbilanz rund 90 % der Inputmasse aus. Mit Ausnahme von Eisenschrott liegt die prozentuelle Verteilung des Inputs der Aufbereitungsanlage auf die Produkte im Jahresdurchschnitt in der gleichen Größenordnung wie beim Vorversuch.

5.2 Zusammensetzung der Produkte der Anlage

Im folgenden wird die Probenahme der Outputgüter, die Probenaufbereitung und die Analytik zur Bestimmung der Stoffkonzentrationen beschrieben. Aus den Güterflüssen und den Stoffkonzentrationen in den einzelnen Gütern werden schließlich die Stoffflüsse durch die Sortier- und Aufbereitungsanlage von Baurestmassen berechnet und Rückschlüsse auf die stoffliche Zusammensetzung des Inputs gezogen.

5.2.1 Probenahme der Outputgüter

Die Probenahme wurde von der Abteilung Abfallwirtschaft durchgeführt; folgende Güter wurden beprobt:

- Wasser (Zulauf)
- Fraktion 1 (Korngrößen 16-32 mm)
- Fraktion 2 (Korngrößen 4-16 mm)
- Fraktion 3 (Korngrößen 0-4 mm)
- Leichtgut
- Abwasser
- Abwassersediment

Eine Einzelprobe im Ausmaß von 1000 ml für das **Wasser (Zulauf)** wurde dem Wasserreservoir direkt entnommen, welches teilweise aus der Salzach und teilweise aus einem Grundwasserbrunnen gespeist wird.

Die mineralischen Güter „**Fraktion 1**“, „**Fraktion 2**“ und **Fraktion 3**“ wurden nach einer einheitlichen Methodik beprobt: es wurden jeweils 5 Mischproben von jeweils etwa 3-4 kg an verschiedenen Punkten (aus verschiedenen Horizonten) der Schüttkegel entnommen und verwogen. Zusätzlich wurde von diesen Fraktionen auch der Wassergehalt vor Ort bestimmt.

Für das **Leichtgut** wurden insgesamt 5 Mischproben von jeweils etwa 2 kg von verschiedenen Punkten der Leichtgutbox entnommen und verwogen.

Vom „**Abwasser**“ wurden insgesamt 6 Proben zu je 1000 ml direkt vom Zulauf zum Sedimentationsbecken entnommen. Die erste Probe wurde unmittelbar bei Versuchsbeginn entnommen (Nullprobe). Die weiteren Zeitpunkte der Probenahme wurden durch Einbringen von Schwimmkörpern in das Abwasser auf die Zeitpunkte der Geschwindigkeitsmessungen abgestimmt. Die Outputgüter Holz und Kunststoffe wurden nicht beprobt, da ihr Massenanteil weit unter 1 % des Inputs liegt.

5.2.2 Probenaufbereitung und Analytik

Die gesamte Probenaufbereitung und Analytik wurde vom Labor des Umweltbundesamtes durchgeführt.

Wasserproben:

Das in den Abwasserproben enthaltene Sediment wurde über ein Faltenfilter abfiltriert, getrocknet (30°C), in einer Kugelmühle vermahlen und wie die Festproben aufgeschlossen und analysiert. Für die Analyse der Wasserproben wurden folgende Bestimmungsmethoden eingesetzt:

| | |
|--|--|
| TOC (gesamter organisch gebundener Kohlenstoff): | ÖNORM M 6284 |
| Chlorid, Sulfat:..... | ÖNORM M 6283 (Ionenchromatographie/DX 300) |
| Ca, Al, Fe, Cu, Cr:..... | ÖNORM M 6279 (ICP/Optima 3000XL) |
| Cd: | DIN 38406 TI. 91 (AAS/5100 Zeeman-PC bzw. SIMAA 6000) |
| Pb: | DIN 38406 TI. 6 (AAS/5100 Zeeman-PC) |
| Hg: | DIN 38406 TI. 12 (FIAS 200, 1100 B) |

Festproben:

Alle Festproben wurden, um Verluste von Quecksilberverbindungen zu vermeiden, bei 30°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.

Die Proben der Fraktionen 1 (Korngrößen 16-32 mm) und 2 (Korngrößen 4-16 mm) wurden im Backenbrecher zerkleinert und, ebenso wie die Fraktion 3 (Korngrößen 0-4 mm), in der Scheibenschwingmühle vermahlen.

Die Proben der "Leichtfraktion" wurden in der Schneidmühle vermahlen.

Sämtliche Festproben wurden vor der weiteren Bearbeitung im Tetraedermischer homogenisiert.

Die Analyse der Festproben (inkl. Abwassersediment) erfolgte gemäß folgender Analysemethoden:

- Bestimmung des Gesamtkohlenstoffes nach ÖNORM L 1080:
Die getrocknete Probe wurde bei 1.300°C im Sauerstoffstrom verbrannt. Das entstehende Kohlendioxid wird anschließend coulometrisch detektiert.
- Bestimmung des anorganischen Kohlenstoffes nach ÖNORM L 1084:
Der anorganische Kohlenstoff wurde mit Salzsäure aus der getrockneten Probe freigesetzt und das entstehende Kohlendioxid gasvolumetrisch gemessen.
- Bestimmung des Gesamtschwefels:
Die getrocknete Probe wurde bei 1.300°C im Sauerstoffstrom verbrannt und das gebildete Schwefeldioxid anschließend coulometrisch detektiert.
- Bestimmung des Gesamtchlors:
Die getrocknete Probe wurde mit Natriumperoxid unter Druck und Temperatur aufgeschlossen. Die entstandene Schmelze wird mit verdünnter Salpetersäure aufgelöst. In einem Aliquot der Aufschlußlösung wird Chlorid mittels potentiometrischer Titration mit einer Silbernitratlösung bestimmt. Als Sensorelektrode wird eine chloridsensitive Elektrode verwendet.
- Bestimmung von Silicium mittels RFA:
25 g der homogenisierten Probe wurden zur Herstellung von Preßlingen (Preßhilfe-Hoechstwachs C) eingesetzt. Die Messung erfolgte mit dem RFA-Gerät SRS 300.
- Bestimmung der Elemente nach Königswasseraufschluß:
1 g der homogenisierten Probe (0,5 g Abwassersediment) wurden, unter Verwendung eines Absorptionsaufsatzes, mittels Königswasser nach DIN 38414 TI.7 aufgeschlossen.

Die Messung der Elemente Ca, Al, Fe, Cu, Zn, Cr, Pb erfolgte mittels ICP (Optima 3000XL) gemäß ÖNORM M 6279.

Die Messung von Cd erfolgte mittels AAS (5100 Zeeman-PC bzw. SIMAA 6000) gemäß DIN 38406 TI 12.

5.2.3 Auswertung der Analyseergebnisse

Die gesamten Analyseergebnisse befinden sich im Anhang. Die geschätzten Stoffkonzentrationsmittelwerte der jeweiligen 5 Mischproben und deren Unsicherheit werden in Tab. 5-3 dargestellt. Das approximative 100(1- α) % Konfidenzintervall mit $\alpha=0,05$ für den Mittelwert läßt sich folgendermaßen darstellen:

$$\left[\bar{Y} - t_{a-1;1-\alpha/2} S_{\bar{Y}}; \bar{Y} + t_{a-1;1-\alpha/2} S_{\bar{Y}} \right] \quad \text{Gleichung 5-1}$$

- mit $S_{\bar{Y}}^2$: Varianz des Mittelwertes der Mischprobenkonzentration
 \bar{Y} : arithmetisches Mittel aller Meßwerte der Mischproben
 $t_{a-1;1-\alpha/2}$: das 0,975 Quantil der t-Verteilung mit (a-1) Freiheitsgraden
a: Anzahl der Mischproben

Die Werte "<x" liegen unterhalb der Erfassungsgrenze des angewendeten Analyseverfahrens, ebenso wie die **Konzentration von Gesamtchlor**, die bei allen Feststoffen **unterhalb der Erfassungsgrenze von 1,5 g/kg** des Nachweisverfahrens liegt und deshalb nicht angegeben werden kann. **Von einer Bestimmung des Gesamtchlors mußte deshalb für die weiteren Analysen abgesehen werden.**

Tab. 5-3: Mittelwerte und Unsicherheit der Stoffkonzentrationen der beprobten Güter im Vorversuch

| Stoffe | Wasser | Fraktion 1 (16-32 mm) | Fraktion 2 (4-16 mm) | Fraktion 3 (0-4 mm) | Leichtgut | Abwasser- sediment | Abwasser |
|---------------------|--------|--------------------------|-------------------------|------------------------|-----------|-----------------------|-----------|
| Matrix- elemente | [mg/l] | [g/kg TS] | | | | | [mg/l] |
| S | 6 | 2,4±0,4 | 2±0,2 | 1,4±0,3 | 5,9±1,1 | 2,5±0,3 | 45±18 |
| TC | n.b. | 64±5 | 75±5 | 83±6 | 210±33 | 84±4 | n.b. |
| TIC | n.b. | 56±6 | 66±5 | 76±6 | 30±2 | 64±5 | n.b. |
| TOC | 1 | 7,8±2 | 8,4±4 | 6,8±4 | 180±34 | 21±4 | 4,7±2 |
| Si | n.b. | 160±14 | 130±15 | 120±13 | 120±10 | n.b. | n.b. |
| Cl | 2 | <1,5 | <1,5 | <1,5 | <1,5 | <1,5 | 7,5±3,6 |
| Ca | 37 | 200±13 | 210±8 | 210±5 | 140±1 | 200±10 | 84±33 |
| Al | <10 | 12±0,6 | 9,6±0,1 | 6,6±0,6 | 13±2 | 14±1 | 0,41±0,1 |
| Fe | 0,03 | 9,1±0,7 | 7,9±0,1 | 6,9±0,6 | 8,1±0,1 | 12±2 | 0,04±0,02 |
| Spuren- elemente | [µg/l] | [mg/kg TS] | | | | | [µg/l] |
| Zn | <4 | 61±22 | 42±6,7 | 44±9 | 84±23 | 110±35 | <4 |
| Pb | <1 | 110±73 | 64±26 | 56±15 | 56±20 | 67±19 | <1 |
| Cr | <2 | 17±0,8 | 15±2 | 13±0,9 | 54±5 | 33±2 | 40±6 |
| Cu | <2,5 | 12±3,5 | 8,1±1,7 | 11±1 | 15±2,3 | 22±5 | 11±7 |
| Cd | <0,05 | 0,20±0,05 | 0,17±0,03 | 0,14±0,01 | 0,26±0,05 | 0,32±0,03 | <0,05 |
| Hg | <0,5 | <0,08 | <0,05 | 0,06±0,01 | 0,14±0,06 | 0,26±0,1 | <0,5 |

n.b. nicht bestimmt

Die **Fraktionen 1** (bestehend aus Material mit einem Korngrössenspektrum von 16-32 mm), **2** (bestehend aus Material mit einem Korngrössenspektrum von 4-16 mm) und **3** (bestehend aus Material mit einem Korngrössenspektrum von 0-4 mm) sind vorwiegend anorganische Fraktionen; der Gehalt an organischem Kohlenstoff beträgt rund 8g/kg. Sie zeigen für fast alle untersuchten Elemente ähnliche Meßresultate. Die mengenmäßig wichtigsten untersuchten Inhaltsstoffe sind das Silizium mit rund 15 % und das Kalzium mit rund 20 %, sowie die Metalle Aluminium und Eisen. Die untersuchten Spurenelemente liegen im Konzentrationsbereich von <0,05-100 mg/kg TS. Die Konzentration von Blei in der Fraktion 1 ist rund doppelt so groß wie in den Fraktionen 2 und 3.

Das **Leichtgut**, bestehend aus kleinen Stücken von Holz, Kunststoff, Isolier- und Installationsmaterial enthält als wichtigstes Element den organischen Kohlenstoff (TOC 18 %). Der Gehalt an Kalzium ist niedriger als in den Fraktionen 1-3, die übrigen Matrixelemente, mit Ausnahme des Schwefels, sind ähnlich. Abgesehen von einem höheren Gehalt an organischem Kohlenstoff weist das **Abwassersediment**, das vor allem aus der Feinstfraktion des Inputmaterials besteht, ähnliche Stoffkonzentrationen auf wie die Fraktionen 1-3. Das **Abwasser** weist insgesamt niedrigere Stoffkonzentrationen auf.

Es ist zu erkennen, daß die Zusammensetzung der untersuchten Güter hinsichtlich der Spurenelemente relativ inhomogen ist. Bei den Matrixelementen unterliegt vor allem der Gehalt an organischem Kohlenstoff starken Schwankungen.

5.3 Verteilung der Stoffe bei der Aufbereitung und Berechnung der Inputzusammensetzung

Im Folgenden werden die absolute (Tab. 5-4) und die relative (Tab. 5-6) Verteilung der Stoffe auf die untersuchten Fraktionen diskutiert.

5.3.1 Stoffflüsse

Die mittleren Stoffkonzentrationen (siehe Tab. 5-3) multipliziert mit den mittleren Güterflüssen (siehe Tab. 5-1) der Outputfraktionen ergeben die zugehörigen mittleren Stoffflüsse (siehe Tab. 5-4). Die Summe der Stoffflüsse über die Outputs muß auf Grund der Massenerhaltung mit dem Stofffluß des Inputs übereinstimmen. Bei der vorliegenden Berechnung wurde der Stofffluß über die Outputgüter Holz und Kunststoffe aufgrund deren geringer Masse (0,06 t/h Tab. 5-1) vernachlässigt. Es läßt sich abschätzen, daß der dabei vernachlässigte Kohlenstofffluß rund 0,027 t/h (Annahme: Kohlenstoffgehalt maximal 70 %TS), bzw. rund 5 % des mittleren im Inputmaterial enthaltenen organischen Kohlenstoffes ausmacht. Bei der Berechnung der Inputzusammensetzung mit einer Schwankungsbreite des TOC von 6 bis 15 g/kg (siehe Tab. 5-5) zeigt sich, daß diese Vernachlässigung gerechtfertigt ist. Ebenso werden die Stoffflüsse über das Inputgut Wasser wegen sehr kleiner bzw. nicht mehr erfaßbarer Stoffkonzentrationen nicht berücksichtigt.

Tab. 5-4: Mittelwerte der Stoffflüsse durch die Aufbereitungsanlage im Vorversuch

| Stoffe | Bauschutt berechnet | Fraktion 1 (16-32 mm) | Fraktion 2 (4-16 mm) | Fraktion 3 (0-4 mm) | Leichtgut | Abwasser- sediment | Ab wasser | Eisen- schrott |
|--------|------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|-----------|-----------------------|--------------|-------------------|
| | | [kg/h] | | | | | | |
| Matrix | = \sum AbisG | A | B | C | D | E | F | G |
| S | 170 | 40 | 52 | 36 | 5 | 18 | 22 | - |
| TC | 5.800 | 990 | 2.000 | 2.050 | 170 | 610 | n.b. | - |
| TIC | 5.000 | 870 | 1.750 | 1.900 | 24 | 460 | n.b. | - |
| TOC | 800 | 120 | 220 | 170 | 140 | 150 | 1,6 | - |
| Si | 9.000 | 2.400 | 3.500 | 3.000 | 90 | n.b. | n.b. | - |
| Ca | 15.200 | 3.000 | 5.400 | 5.200 | 110 | 1430 | 40 | - |
| Al | 710 | 180 | 250 | 160 | 10 | 100 | 0,2 | - |
| Fe | 760 | 140 | 210 | 170 | 6 | 90 | 0,02 | 150 |
| | | [g/h] | | | | | | |
| Spuren | | | | | | | | |
| Zn | 4.000 | 900 | 1.100 | 1.100 | 70 | 800 | <2 | - |
| Pb | 5.300 | 1.700 | 1.700 | 1.400 | 40 | 500 | <1 | - |
| Cr | 1.300 | 270 | 410 | 310 | 40 | 240 | 20 | - |
| Cu | 800 | 200 | 210 | 270 | 12 | 160 | 6 | - |
| Cd | 14 | 3 | 4,4 | 3,6 | 0,2 | 2,3 | <0,02 | - |
| Hg | 3,5 | <1,2 | <1,3 | 1,5 | 0,11 | 1,9 | <0,2 | - |

n.b.....nicht bestimmt

Während des Vorversuches durchliefen die Aufbereitungsanlage in einer Stunde rund 15 Tonnen Kalzium, 9 Tonnen Silizium, 0,8 Tonnen organischer Kohlenstoff und jeweils rund 0,7 Tonnen Eisen und Aluminium. Sie waren begleitet von Spurenelementen wie Blei (5 kg), Zink (4 kg) und Chrom (1 kg).

5.3.2 Berechnete Zusammensetzung des Inputs

Aus der Summe der Stoffflüsse (Tab. 5-4) und der pro Stunde aufbereiteten Bauschuttmenge (Tab. 5-1) wird die stoffliche Zusammensetzung des Inputs nach folgender Gleichung berechnet:

$$\bar{C}_{Input}^k = \frac{1}{\dot{m}_{Input}} \cdot \sum_{j=1}^n \dot{m}_j \cdot \bar{C}_j^k \quad \text{Gleichung 5-2}$$

mit C: Konzentration des Elementes in den Gütern
 k: k-tes Element (Stoff)
 \dot{m} : Flüsse der Güter in kg/h
 j: Outputgüter (j=1...n)

Die folgende Tabelle (Tab. 5-5) gibt die Zusammensetzung des **im Vorversuch** aufbereiteten vorsortierten Bauschutts wieder.

Tab. 5-5: Aus dem Output berechnete Zusammensetzung des im Vorversuch aufbereiteten sortierten Bauschutts

| Stoff | vorsortierter Bauschutt (Vorversuch) | | |
|-----------------------|--------------------------------------|--------------|---------------|
| | Mittelwert | obere Grenze | untere Grenze |
| Matrixelemente | [g/kg] | | |
| S | 2,3 | 2,8 | 1,8 |
| TC | 72 | 79 | 66 |
| TIC | 62 | 69 | 56 |
| TOC | 10 | 15 | 6 |
| Si | 110 | 130 | 100 |
| Ca | 190 | 200 | 180 |
| H ₂ O | 83 | 100 | 60 |
| Al | 9 | 10 | 8 |
| Fe | 10 | 11 | 8 |
| Spurenelemente | [mg/kg] | | |
| Zn | 50 | 66 | 34 |
| Pb | 66 | 103 | 30 |
| Cr | 16 | 18 | 14 |
| Cu | 11 | 13 | 8 |
| Cd | 0,19 | 0,22 | 0,15 |
| Hg | 0,04 | - | - |

5.3.3 Transferkoeffizienten

Die Bestimmung der **mittleren Transferkoeffizienten** $\bar{T}_{k,N}$ des Stoffes k vom Input in die Outputfraktion N berechnet sich nach Gleichung 5-3:

$$\bar{T}_{k,N} = \frac{\bar{S}_{k,N}}{\sum_{j=1}^n \bar{S}_{k,j}} \quad \text{Gleichung 5-3}$$

mit k: k-tes Element (Stoff)
 N: betrachtete Outputfraktion (Outputgut)
 j: Outputgüter mit j=1...N...n
 $\bar{S}_{k,N}$: mittlerer Stofffluß des k-ten Elementes über die Fraktion N

Zur Abschätzung der Unsicherheit der Transferkoeffizienten wird das Gaussche Fehlerfortpflanzungsgesetz angewendet. Die Varianzen der Stoffflüsse werden nach Gleichung 5-4 berechnet.

$$Var[f(x_1, x_2, \dots, x_n)] \approx \sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta f}{\delta x_i} \right)^2 Var(x_i) + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j>i}^n \frac{\delta f}{\delta x_i} \frac{\delta f}{\delta x_j} cov(x_i, x_j) \quad \text{Gleichung 5-4}$$

Dabei wird vereinfachend die Unabhängigkeit der einzelnen Parameter vorausgesetzt (Kovarianzterme werden null gesetzt) und werden die Varianzen der Massenflüsse vernachlässigt (sind im Verhältnis zu den Varianzen der Stoffkonzentrationen vernachlässigbar klein).

Mit den so errechneten Varianzen wird über Gleichung 5-5 ein approximatives 100(1- α) % Konfidenzintervall mit $\alpha = 0,05$ berechnet:

$$f(x_1, \dots, x_n) - Z_{1-\alpha/2} \sqrt{Var(f(x_1, \dots, x_n))} \leq \mu \leq f(x_1, \dots, x_n) + Z_{1-\alpha/2} \sqrt{Var(f(x_1, \dots, x_n))} \quad \text{Gleichung 5-5}$$

Dabei ist Z_p das p-Quantil der Standardnormalverteilung.

Zur übersichtlicheren Darstellung wurden die Transferkoeffizienten und deren geschätzte Unsicherheiten mit 100 multipliziert, die so berechnete Stoffverteilung wird in der folgenden Tabelle dargestellt:

Tab. 5-6: Prozentuelle Verteilung der Stoffe auf die Produkte der Anlage und ihre Unsicherheit

| Stoffe % | Fraktion 1 (16-32 mm) | Fraktion 2 (4-16 mm) | Fraktion 3 (0-4 mm) | Eisen-schrott | Leichtgut | Abwaser-sediment | Abwasser | Σ quer (ge-rundet) |
|----------|-----------------------|----------------------|---------------------|---------------|------------|------------------|------------|---------------------------|
| S | 22±3 | 31±3 | 21±3 | n.b. | 2,7±0,5 | 11±1 | 13±4 | 100 |
| TC | 17±1 | 34±2 | 35±2 | n.b. | 2,9±0,4 | 11±0,6 | n.b. | 100 |
| TIC | 17±2 | 35±2 | 38±2 | n.b. | 0,5±<0,001 | 9,2±0,7 | n.b. | 100 |
| TOC | 15±4 | 28±9 | 21±9 | n.b. | 18±4 | 19±4 | 0,2±0,1 | 100 |
| Si | 27±2 | 38±3 | 33±3 | n.b. | 1±0,1 | n.b. | n.b. | 100 |
| Ca | 20±1 | 36±1 | 34±1 | n.b. | 0,7±0,1 | 9,4±0,4 | 0,3±0,1 | 100 |
| Al | 26±2 | 36±3 | 23±2 | n.b. | 1,4±0,2 | 14±1 | 0,03±0,006 | 100 |
| Fe | 19±2 | 28±3 | 22±2 | 20 | 0,7±0,1 | 12±2 | <0,003 | 100 |
| Zn | 24±6 | 28±4 | 27±5 | n.b. | 1,7±0,4 | 20±5 | <0,05 | 100 |
| Pb | 32±14 | 32±10 | 26±8 | n.b. | 0,8±0,3 | 9±3 | <0,02 | 100 |
| Cr | 21±1 | 31±3 | 24±2 | n.b. | 3,3±0,3 | 19±1 | 1,5±0,2 | 100 |
| Cu | 22±5 | 25±4 | 32±3 | n.b. | 1,4±0,2 | 19±4 | 0,7±0,4 | 100 |
| Cd | 22±4 | 33±4 | 25±2 | n.b. | 1,5±0,3 | 17±2 | <0,14 | 100 |
| Hg | <24 | <23 | 24±10 | n.b. | 0,022±1,4 | 25±11 | <5,7 | 100 |

n.b. nicht bestimmt

Tabelle 5-6 zeigt, daß sich bei der Aufbereitung die meisten Stoffe relativ gleichmäßig auf die Fraktionen 1-3 verteilen. In das Abwasser gelangen, abgesehen von Schwefel und Chrom, weniger als 1 % aller untersuchten Elemente. Bei Blei fällt die hohe Unsicherheit bei der Verteilung auf.

5.3.4 Anreicherung

Das Ziel der Bauschutttaufbereitungsanlage besteht darin, aus Baurestmassen neue Fraktionen herzustellen, die rezirkuliert werden können, wobei zwangsweise auch Fraktionen anfallen, die entsorgt werden müssen. Für eine Wiederverwertung der rezirkulierbaren Fraktionen ist die Kenntnis über eine eventuelle Anreicherung bzw. Abminderung einzelner Stoffe bei der Aufbereitung von Bedeutung.

Der Anreicherungsfaktor gibt an, wie stark ein Element in einer Fraktion F gegenüber der Zusammensetzung des Eingangsmaterials E (Input) angereichert, respektive abgemindert ist. Anreicherungsfaktoren werden folgendermaßen berechnet:

$$k_{CF} = CF/CE$$

k_{CF} = Anreicherungsfaktor

CF = Konzentration des Elementes X in der Fraktion F

CE = Konzentration des Elementes X im Eingangsmaterial E

Ein Anreicherungsfaktor von 18 für organischen Kohlenstoff im Leichtgut bedeutet z. B., daß in dieser Fraktion die Konzentration von organischem Kohlenstoff 18 mal höher ist, als die Durchschnittskonzentration im Eingangsmaterial. Ein Anreicherungsfaktor von 1 bedeutet, daß keine Anreicherung stattgefunden hat. Ein Anreicherungsfaktor von 0,5 bedeutet hingegen, daß der Stoff gegenüber dem Input um das 2-fache abgemindert wurde. Die Abminderung entspricht dem reziproken Wert des Anreicherungsfaktors.

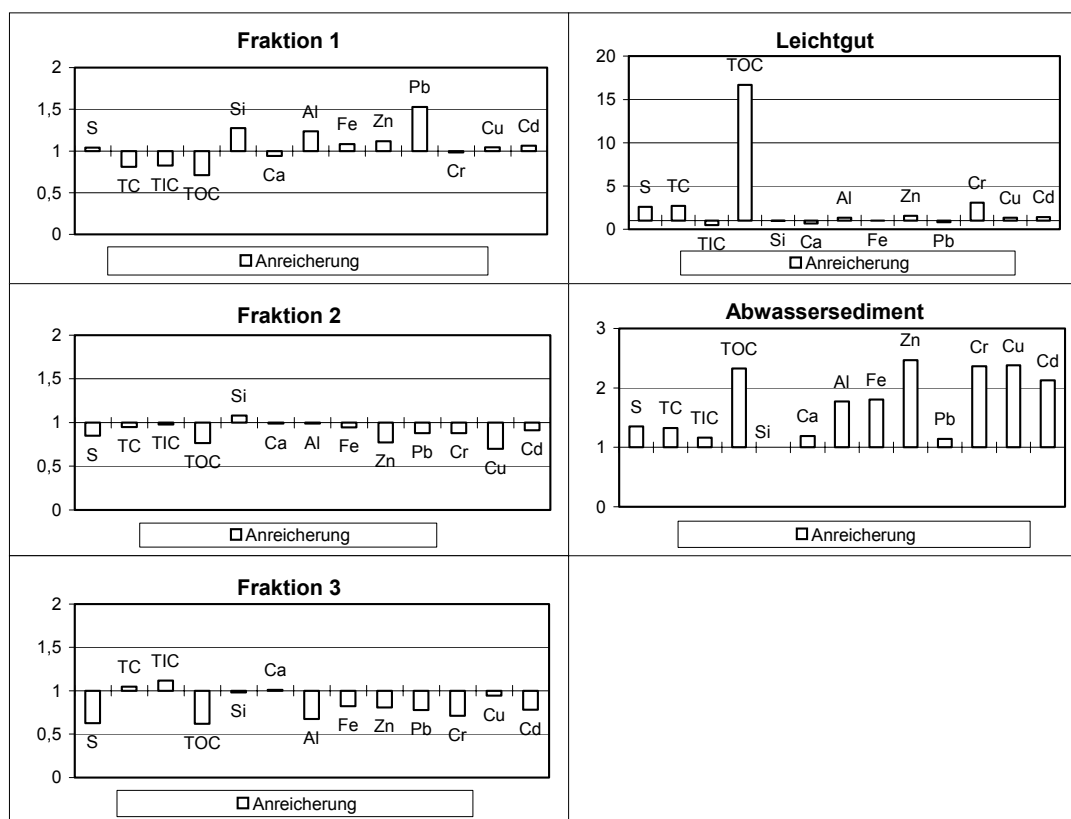


Abb. 5-2: Anreicherung der untersuchten Elemente in den Sortierfraktionen des Vorversuches

Abbildung 5-2 läßt erkennen, daß in **Fraktion 1 (16-32 mm)** eine geringfügige Anreicherung von Silizium, Aluminium, Eisen, Zink und Blei stattfindet, wobei gerade der Bleiwert mit großer Unsicherheit behaftet ist (siehe Tab. 5-3). In **Fraktion 2 (4-16 mm)** und **3 (0-4 mm)** findet eine geringfügige Abreicherung fast aller Elemente statt, wohingegen im **Abwassersediment** vor allem die Spurenelemente angereichert vorliegen.

5.4 Folgerungen aus dem Vorversuch

1. Es zeigte sich, daß die Werte der Stoffkonzentrationen in den Produkten der Anlage erheblichen Schwankungen unterworfen sind. Die geschätzte optimale Probenanzahl, die genommen werden müßte, um ein 95 % Konfidenzintervall mit einer relativen Breite von ± 10 % bezogen auf das arithmetische Mittel der Stoffkonzentrationen einzuhalten, ist für die einzelnen Elemente sehr unterschiedlich.

Tab. 5-7: geschätzte optimale Probenanzahl zur Einhaltung eines 95 % Konfidenzintervalles mit einer relativen Breite von ± 10 %

| Stoffe | Fraktion 1 (16-32 mm) | Fraktion 2 (4-16 mm) | Fraktion 3 (0-4 mm) | Leichtgut | Abwassersediment |
|--------|--------------------------|-------------------------|------------------------|-----------|------------------|
| S | 9 | 4 | 12 | 12 | 5 |
| TC | 3 | 2 | 2 | 9 | 1 |
| TIC | 5 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| TOC | 24 | 93 | 111 | 13 | 16 |
| Si | 3 | 5 | 4 | 3 | - |
| Ca | 2 | 1 | 1 | 3 | 1 |
| Al | 1 | 8 | 3 | 9 | 2 |
| Fe | 2 | 10 | 3 | 1 | 6 |
| Zn | 52 | 10 | 16 | 28 | 41 |
| Pb | 169 | 63 | 29 | 50 | 30 |
| Cr | 1 | 9 | 2 | 3 | 1 |
| Cu | 34 | 17 | 4 | 9 | 23 |
| Cd | 21 | 13 | 2 | 13 | 4 |
| Hg | ? | ? | 4 | 83 | 87 |

Die größten Schwankungsbreiten traten bei der Bestimmung von organischem Kohlenstoff und Blei in den Fraktionen 3 bzw. 1 auf. Um diese beiden Stoffe mit der gewünschten Genauigkeit bestimmen zu können, müßten 111 Proben der Fraktion 3 respektive 169 Proben der Fraktion 1 gezogen werden, was den zeitlichen und finanziellen Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Es muß deshalb ein Kompromiß hinsichtlich der Genauigkeit der Ergebnisse und der Höhe der Kosten eingegangen werden, was bedeutet, daß auch für die beiden vorgesehenen Hauptversuchsreihen pro Versuchseinheit von jeder Outputfraktion 5 Proben gezogen werden.

2. Die Anlage verteilt im Wesentlichen die in den Baurestmassen angelieferten Stoffe auf die vier Produkte „Fraktion 1“, „Fraktion 2“, „Fraktion 3“ und „Abwassersediment“, eine deutliche Diskriminierung nach stofflichen Gesichtspunkten findet für die Hauptfraktionen nicht statt. Eine Ausnahme bildet das Leichtgut, in dem vor allem der organische Kohlenstoff stark angereichert ist. Im Abwassersediment sind die Konzentrationen der Schwermetalle generell um den Faktor 2 höher als in den verarbeiteten Baurestmassen.

6 ERSTER HAUPTVERSUCH ZUR ERSTELLUNG EINER STOFFFLUSSANALYSE DER ANLAGE

Der erste Hauptversuch hatte zum Ziel:

- die Erstellung einer Stoffflußanalyse auf Basis einer repräsentativen Beprobung der Produkte von **aufbereitetem Bauschutt (Hauptversuch 1a)**
- die Erstellung einer Stoffflußanalyse auf Basis einer repräsentativen Beprobung der Produkte von **aufbereitetem Betonabbruch (Hauptversuch 1b)**

6.1 Güterflüsse des Hauptversuches

Zunächst wurden, analog dem Vorversuch, die während der Versuchsdauer anfallenden Gütermengen bestimmt. Die Aufbereitung des Bauschutts dauerte rund 100 Minuten, die des Betonabbruchs rund 150 Minuten.

6.1.1 Durchführung der Messungen

Die Massen der festen Güter wurden wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben erfaßt. Die Abwassermasse wurde mit einem Durchflußmeßgerät für teil- und vollgefüllte Kanäle ermittelt. Die Geschwindigkeitsmessung erfolgt bei diesem Gerät nach dem magnet-induktiven Prinzip und die Füllstandsmessung nach dem Prinzip der Widerstandsmeßbrücke nach Wheatstone mit Hilfe eines piezoresistiven Druckaufnehmers. Der Wasserverbrauch der Anlage wurde aus der Abwassermasse und dem Wassergehalt der Produkte berechnet.

6.1.2 Ergebnisse

Tab. 6-1: Güterflüsse von Hauptversuch 1a: vorsortierter Bauschutt

| | Güterflüsse feucht [t/h] | Wassergehalt [g/100g FS] | Güterflüsse trocken [t/h] | Wasser [t/h] |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------|
| Inputgüter | | | | |
| vorsortierter Bauschutt | 58 | 8 | 53 | 4,8 |
| Wasser | 160-190 | - | - | 160-190 |
| Summe (gerundet) | 220-250 | - | 53 | 170-200 |
| Outputgüter | | | | |
| Eisenschrott | 0,14 | n.b. | 0,14 | n.b. |
| Holz etc. | 0,07 | n.b. | 0,07 | n.b. |
| Leichtgut | 1,2 | 45 | 0,7 | 0,5 |
| Abwasser | 160-190 | - | - | 160-190 |
| Abwassersediment (TS) | 3,8-4,6 | - | 3,8-4,6 | - |
| Fraktion 1 (16-32 mm) | 14 | 6,6 | 13 | 0,9 |
| Fraktion 2 (4-16 mm) | 20 | 8,2 | 19 | 1,7 |
| Fraktion 3 (0-4 mm) | 20 | 18 | 16 | 3,7 |
| Summe (gerundet) | 220-250 | - | 53 | 170-200 |

n.b.....nicht bestimmt

Tab. 6-2: Güterflüsse von Hauptversuch 1b: Betonabbruch

| | Güterflüsse feucht [t/h] | Wassergehalt [g/100g FS] | Güterflüsse trocken [t/h] | Wasser [t/h] |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------|
| Inputgüter | | | | |
| Betonabbruch | 32 | 5,6 | 30 | 1,8 |
| Wasser | 160-200 | - | | 160-200 |
| Summe (gerundet) | 190-230 | - | 30 | 160-200 |
| Outputgüter | | | | |
| Eisenschrott | 0,1 | n.b. | 0,1 | n.b. |
| Holz etc. | 0,01 | n.b. | 0,01 | n.b. |
| Leichtgut | 0,19 | 66 | 0,07 | 0,12 |
| Abwasser | 160-200 | - | - | 160-200 |
| Abwassersediment (TS) | 2,1-2,5 | - | 2,1-2,5 | - |
| Fraktion 1 (16-32 mm) | 7,6 | 3,4 | 7,3 | 0,26 |
| Fraktion 2 (4-16 mm) | 14 | 4 | 13 | 0,55 |
| Fraktion 3 (0-4 mm) | 11 | 12 | 9,5 | 1,3 |
| Summe (gerundet) | 200-240 | - | 32 | 160-200 |

n.b.....nicht bestimmt

6.2 Zusammensetzung der Produkte der Anlage (Hauptversuch 1)

Die **Probenahme** der Outputgüter, die **Analytik** zur Bestimmung der Stoffkonzentrationen und die **statistische Auswertung** der Ergebnisse erfolgte gemäß der **Beschreibung in Kapitel 5.2 und 5.3**.

Tab. 6-3: Probenahme der Outputgüter

| Gut | entnommene Probenzahl | | davon analysiert | Analyse pro Probe und Stoff |
|------------------|-----------------------|--------------|------------------|-----------------------------|
| | sortierter Bauschutt | Betonabbruch | | |
| Fraktion 1 | 5 | 5 | 5 | 1 |
| Fraktion 2 | 5 | 5 | 5 | 1 |
| Fraktion 3 | 5 | 5 | 5 | 1 |
| Leichtgut | 5 | 1 | 5 bzw. 1 | 1 |
| Abwasser | 5 | 5 | 5 | 1 |
| Abwassersediment | 5 | 5 | 5 | 1 |

Bei der Aufbereitung von Betonabbruch fiel eine geringe Menge von Leichtgut an, aus welcher nur eine einzige Mischprobe gezogen wurde.

Die Analyse der Outputfraktionen bei der Aufbereitung von **vorsortiertem Bauschutt** ergab im ersten Hauptversuch folgende Stoffkonzentrationen:

Tab.6-4: Mittelwerte und Unsicherheit der Stoffkonzentrationen der beprobten Güter in Hauptversuch 1a (Input: vorsortierter Bauschutt)

| Stoffe | Fraktion 1 (16-32 mm) | Fraktion 2 (4-16 mm) | Fraktion 3 (0-4 mm) | Leichtgut | Abwasser- sediment | Abwasser |
|---------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|-----------|-----------------------|------------|
| Matrix | [g/kg TS] | | | | [mg/l] | |
| S | 1,9±0,4 | 2±0,5 | 2±0,3 | 5,9±1,4 | 2,3±0,4 | 110±80 |
| TC | 68±6 | 74±2 | 78±5 | 130±10 | 77±5 | n.b. |
| TIC | 62±3 | 64±8 | 64±15 | 27±4 | 58±4 | n.b. |
| TOC | 6,2±5,8 | 9,8±6 | 14±12 | 100±14 | 19±5 | 11±9 |
| Si | 160±14 | 140±5 | 140±11 | 160±8 | n.b. | n.b. |
| Cl | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | 56±57 |
| Ca | 210±9 | 210±9 | 200±8 | 150±6 | 190±4 | 104±77 |
| Al | 9±2 | 8,6±1 | 7,6±2,2 | 13±9 | 20±4 | 0,1±0,02 |
| Fe | 8±1 | 7,8±0,8 | 7,6±1,4 | 8,6±0,8 | 13±2 | 0,01±0,002 |
| Spuren | [mg/kgTS] | | | | [µg/l] | |
| Zn | 30±12 | 29±6,5 | 34±11 | 73±13 | 132±20 | <1 |
| Pb | 62±18 | 36±11 | 21±4 | 25±5 | 85±13 | <1 |
| Cr | 19±3 | 23±6 | 19±7 | 66±3 | 36±7 | 13±9 |
| Cu | 10±3 | 11±4 | 13±3 | 15±1,5 | 40±5 | 12±6 |
| Cd | 0,14±0,01 | 0,2±0,03 | 0,2±0,01 | 0,6±0,4 | 0,62±0,08 | <0,05 |
| Hg | 0,04±0,01 | 0,04±0,01 | 0,09±0,04 | 0,19±0,04 | 0,6±0,25 | <0,1 |

n.b. nicht bestimmt

Die Analyse der Outputfraktionen bei der Aufbereitung von **Betonabbruch** ergab im ersten Hauptversuch folgende Stoffkonzentrationen:

Tab. 6-5: Mittelwerte und Unsicherheit der Stoffkonzentrationen der beprobten Güter in Hauptversuch 1b (Input: Betonabbruch)

| Stoffe | Fraktion 1 (16-32 mm) | Fraktion 2 (4-16 mm) | Fraktion 3 (0-4 mm) | Leichtgut | Abwasser- sediment | Abwasser |
|---------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|-----------|-----------------------|------------|
| Matrix | [g/kg TS] | | | | [mg/l] | |
| S | 1,4±0,3 | 1±0 | 1,3±0,05 | n.b. | 2,6±0,9 | 17±9 |
| TC | 96±5 | 100±5 | 98±5 | 390 | 81±6 | n.b. |
| TIC | 77±9 | 97±6 | 86±13 | 15 | 69±6 | n.b. |
| TOC | 19±10 | 3,4±1,4 | 12±15 | 370 | 14±2 | 5±1,6 |
| Si | 70±10 | 60±15 | 73±13 | 56 | n.b. | n.b. |
| Cl | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | 5,7±4 |
| Ca | 240±10 | 240±8 | 230±6 | 5,4 | 210±2 | 140±90 |
| Al | 4±1 | 3±0,5 | 3,9±0,5 | 0,4 | 14±4 | 0,4±0,3 |
| Fe | 4±1 | 4±0,7 | 4±0,4 | 0,4 | 13±4 | 0,01±0,001 |
| Spuren | [mg/kgTS] | | | | [µg/l] | |
| Zn | 15±3 | 20±10 | 23±16 | 96 | 230±220 | <1 |
| Pb | <8 | 13±0,4 | 38±36 | 91 | 130±130 | <1 |
| Cr | 9±0,8 | 8±2 | 9±2 | 53 | 33±7 | 7±4 |
| Cu | <5 | <5 | <5 | 13 | 31±16 | 14±7 |
| Cd | 0,18±0,02 | 0,2±0,07 | 0,2±0,02 | 5 | 0,48±0,32 | <0,05 |
| Hg | 0,04±0,02 | 0,04±0,01 | 0,04±0,02 | 0,22 | 0,18±0,04 | <0,1 |

n.b. nicht bestimmt

Die Werte „<x“ liegen unterhalb der Erfassungsgrenze des angewendeten Analyseverfahrens.

Die Stoffkonzentrationen der einzelnen Produkte der Aufbereitung von vorsortiertem Bauschutt im ersten Hauptversuch sind sehr ähnlich den Analysenergebnissen des Vorversuches. Für den Input Betonabbruch liegen die Siliziumgehalte der anorganischen Fraktionen 1, 2 und 3 rund um die Hälfte unter denjenigen des Bauschutts; ebenso sind in diesen Fraktionen auch die Gehalte an Spurenelementen geringer als in den vergleichbaren Outputfraktionen des Bauschutts.

6.3 Verteilung der Stoffe bei der Aufbereitung und Berechnung der Inputzusammensetzung

6.3.1 Stoffflüsse

Bei der Aufbereitung von „vorsortiertem Bauschutt“ fließen im **Hauptversuch 1a** (totaler Durchsatz 58 t/h) folgende Stoffströme durch die Anlage:

Tab. 6-6: Mittelwerte der Stoffflüsse durch die Aufbereitungsanlage (Hauptversuch 1a vorsortierter Bauschutt)

| Stoffe | Bauschutt berechnet | Fraktion 1 (16-32 mm) | Fraktion 2 (4-16 mm) | Fraktion 3 (0-4 mm) | Leichtgut | Abwasser- sediment | Ab- wasser | Eisen- schrott |
|---------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|-----------|-----------------------|---------------|-------------------|
| | | [kg/h] | | | | | | |
| Matrix | =Σ A bis G | A | B | C | D | E | F | G |
| S | 130 | 25 | 37 | 32 | 4 | 9 | 19 | - |
| TC | 4.000 | 900 | 1.400 | 1.300 | 88 | 310 | n.b. | - |
| TIC | 3.300 | 810 | 1.200 | 1.100 | 19 | 230 | n.b. | - |
| TOC | 640 | 80 | 180 | 230 | 69 | 76 | 1,6 | - |
| Si | 6.900 | 1.900 | 2.600 | 2.400 | 110 | n.b. | n.b. | - |
| Ca | 11.000 | 2.700 | 3.900 | 3.200 | 98 | 770 | 18 | - |
| Al | 500 | 120 | 160 | 130 | 9 | 81 | 0,017 | - |
| Fe | 570 | 100 | 150 | 130 | 5,6 | 51 | 0,002 | 140 |
| Spuren | | [g/h] | | | | | | |
| Zn | 2.000 | 400 | 500 | 600 | 48 | 500 | <0,18 | - |
| Pb | 2.200 | 800 | 700 | 300 | 17 | 300 | <0,18 | - |
| Cr | 1.200 | 250 | 420 | 310 | 44 | 100 | 2,3 | - |
| Cu | 740 | 130 | 200 | 200 | 10 | 200 | 2,1 | - |
| Cd | 11 | 1,9 | 3,1 | 2,9 | 0,38 | 2,5 | <0,009 | - |
| Hg | 5,2 | 0,47 | 0,75 | 1,5 | 0,13 | 2,4 | <0,018 | - |

n.b.....nicht bestimmt

Während des Hauptversuches durchliefen die Anlage bei der Aufbereitung von vorsortiertem Bauschutt in einer Stunde rund 11 Tonnen Kalzium, 7 Tonnen Silizium, 0,6 Tonnen organischer Kohlenstoff, rund 0,6 Tonnen Eisen und 0,5 Tonnen Aluminium. Sie waren begleitet von Spurenelementen wie Blei (2 kg), Zink (2 kg) und Chrom (1 kg).

Bei der Aufbereitung von „**Betonabbruch**“ fließen im **Hauptversuch 1b** (totaler Durchsatz 32 t/h) folgende Stoffströme durch die Anlage:

Tab. 6-7: Mittelwerte der Stoffflüsse durch die Aufbereitungsanlage (Hauptversuch 1b Betonabbruch)

| Stoffe | Betonabbruch berechnet | Fraktion 1 (16-32 mm) | Fraktion 2 (4-16 mm) | Fraktion 3 (0-4 mm) | Leichtgut | Abwasser- sediment | Ab- wasser | Eisen- schrott |
|---------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|-----------|-----------------------|---------------|-------------------|
| [kg/h] | | | | | | | | |
| Matrix | =ΣAbisG | A | B | C | D | E | F | G |
| S | 45 | 10 | 14 | 12 | n.b. | 6 | 3 | - |
| TC | 3.200 | 700 | 1.300 | 930 | 26 | 180 | n.b. | - |
| TIC | 2.800 | 570 | 1.300 | 820 | 1 | 160 | n.b. | - |
| TOC | 360 | 140 | 45 | 120 | 25 | 32 | 1,6 | - |
| Si | 2.050 | 530 | 820 | 700 | 3,7 | n.b. | n.b. | - |
| Ca | 7.500 | 1.700 | 3.100 | 2.200 | 3,6 | 470 | 24 | - |
| Al | 140 | 30 | 46 | 37 | 0,3 | 31 | 0,067 | - |
| Fe | 250 | 31 | 48 | 39 | 0,2 | 28 | 0,001 | 100 |
| [g/h] | | | | | | | | |
| Spuren | | | | | | | | |
| Zn | <1.100 | 110 | <270 | 200 | 6 | 530 | <0,18 | - |
| Pb | <1.200 | <300 | <170 | 400 | 6 | 300 | <0,18 | - |
| Cr | 260 | 62 | 110 | 85 | 4 | 70 | 1,3 | - |
| Cu | <250 | <40 | <90 | <50 | 1 | 70 | 2,4 | - |
| Cd | 7,5 | 1,3 | 2,9 | 1,8 | 0,34 | 1,1 | <0,009 | - |
| Hg | 1,7 | 0,3 | 0,6 | 0,4 | 0,015 | 0,4 | <0,018 | - |

n.b.....nicht bestimmt

Während des ersten Hauptversuches durchliefen die Anlage bei der Aufbereitung von Betonabbruch in einer Stunde rund 8 Tonnen Kalzium, 2 Tonnen Silizium, 0,4 Tonnen organischer Kohlenstoff, rund 0,3 Tonnen Eisen und 0,1 Tonnen Aluminium. Sie waren begleitet von Spurenelementen wie Blei (1 kg), Zink (1 kg) und Chrom (0,3 kg).

6.3.2 Berechnete Zusammensetzung des Inputs

Die folgenden Tabellen geben die Zusammensetzung des **im ersten Hauptversuch** aufbereiteten vorsortierten Bauschutts (Tab. 6-8) und Betonabbruchs (Tab. 6-9) wieder; sie wurde nach Gleichung 5-2 aus der Summe der jeweiligen Stoffflüsse (Tab. 6-5 und Tab. 6-6) und der pro Stunde aufbereiteten Mengen (Tab. 6-1 und Tab. 6-2) berechnet.

Es ergibt sich Hauptversuch 1a folgende Zusammensetzung für den Input „vorsortierter Bauschutt“ der Anlage:

Tab. 6-8: Aus dem Output berechnete Zusammensetzung des vorsortierten Bauschutts (Hauptversuch 1a)

| Stoff | vorsortierter Bauschutt (Hauptversuch 1a) | | |
|-----------------------|---|--------------|---------------|
| | Mittelwert | obere Grenze | untere Grenze |
| Matrixelemente | [g/kg] | | |
| S | 2,2 | 2,9 | 1,4 |
| TC | 69 | 73 | 64 |
| TIC | 57 | 67 | 48 |
| TOC | 11 | 20 | 2 |
| Si | 120 | 130 | 110 |
| Ca | 190 | 200 | 180 |
| H ₂ O | 84 | 100 | 65 |
| Al | 9 | 10 | 8 |
| Fe | 10 | 11 | 7 |
| Spurenelemente | [mg/kg] | | |
| Zn | 35 | 47 | 24 |
| Pb | 38 | 50 | 26 |
| Cr | 20 | 27 | 13 |
| Cu | 12 | 16 | 8 |
| Cd | 0,19 | 0,22 | 0,16 |
| Hg | 0,09 | 0,13 | 0,05 |

Es ergibt sich im ersten Hauptversuch folgende Zusammensetzung für den Input „Betonabbruch“ der Anlage:

Tab. 6-9: Aus dem Output berechnete Zusammensetzung des aufbereiteten Betonabbruchs (Hauptversuch 1b)

| Stoff | Betonabbruch (Hauptversuch 1b) | | |
|-----------------------|--------------------------------|--------------|---------------|
| | Mittelwert | obere Grenze | untere Grenze |
| Matrixelemente | [g/kg] | | |
| S | 1,4 | 1,7 | 1,1 |
| TC | 99 | 110 | 92 |
| TIC | 89 | 99 | 77 |
| TOC | 11 | 19 | 1,4 |
| Si | 64 | 79 | 48 |
| Ca | 230 | 250 | 220 |
| H ₂ O | 56 | 65 | 45 |
| Al | 4,5 | 5,4 | 3,5 |
| Fe | 7,7 | 8,7 | 3,1 |
| Spurenelemente | [mg/kg] | | |
| Zn | <35 | - | - |
| Pb | <36 | - | - |
| Cr | 10 | 13 | 8 |
| Cu | <8 | - | - |
| Cd | 0,23 | 0,3 | 0,17 |
| Hg | 0,05 | 0,08 | 0,03 |

6.3.3 Transferkoeffizienten

Die Transferkoeffizienten und ihre Unsicherheit wurden nach den Gleichungen 5.3 bis 5.5 berechnet. Zur übersichtlicheren Darstellung wurden die Transferkoeffizienten und deren geschätzte Unsicherheiten mit 100 multipliziert und so als prozentuelle Verteilung der Stoffe in den folgenden Tabellen angeführt.

Bei der Aufbereitung von „**vorsortiertem Bauschutt**“ verteilen sich die einzelnen Elemente im Hauptversuch 1a folgendermaßen auf die Produkte der Anlage:

Tab. 6-10: Prozentuelle Verteilung der Stoffe auf die Produkte der Anlage und ihre Unsicherheit (Hauptversuch 1a, Input: vorsortierter Bauschutt)

| Stoffe % | Fraktion 1 (16-32 mm) | Fraktion 2 (4-16 mm) | Fraktion 3 (0-4 mm) | Eisen-schrott | Leichtgut | Abwasser-sediment | Ab-wasser | Σ quer (gerundet) |
|----------|-----------------------|----------------------|---------------------|---------------|------------|-------------------|-----------|-------------------|
| S | 20±4 | 29±6 | 25±4 | n.b. | 3±1 | 7,2±1 | 15±8 | 100 |
| TC | 23±2 | 35±1 | 32±1 | n.b. | 2±0,2 | 7,7±0,4 | n.b. | 100 |
| TIC | 25±2 | 36±4 | 32±5 | n.b. | 0,6±0,1 | 6,9±0,7 | n.b. | 100 |
| TOC | 13±10 | 29±14 | 36±19 | n.b. | 11±4 | 12±5 | 0,3±0,1 | 100 |
| Si | 27±2 | 37±1 | 34±2 | n.b. | 1,5±0,1 | n.b. | n.b. | 100 |
| Ca | 26±1 | 36±1 | 30±1 | n.b. | 0,9±<0,001 | 7,2±0,2 | 0,2±0,1 | 100 |
| Al | 25±4 | 32±4 | 25±5 | n.b. | 1,8±0,2 | 16±3 | 0,003 | 100 |
| Fe | 18±3 | 25±3 | 22±4 | 25 | 1±0,1 | 9±1 | 0,0004 | 100 |
| Zn | 18±6 | 26±5 | 28±6 | n.b. | 2,4±0,5 | 26±4 | <0,009 | 100 |
| Pb | 37±7 | 31±7 | 16±3 | n.b. | 0,8±0,2 | 16±3 | <0,008 | 100 |
| Cr | 21±4 | 36±7 | 26±8 | n.b. | 3,7±0,6 | 12±3 | 0,2±0,1 | 100 |
| Cu | 19±5 | 28±8 | 29±5 | n.b. | 1,4±0,2 | 23±4 | 0,3±0,1 | 100 |
| Cd | 18±1 | 29±3 | 27±2 | n.b. | 3,6±2 | 23±2 | <0,08 | 100 |
| Hg | 9±3 | 14±3 | 28±9 | n.b. | 2,4±0,7 | 46±10 | <0,35 | 100 |

n.b. nicht bestimmt

Aus Tab. 6-10 ist zu entnehmen, daß sich bei der Aufbereitung von vorsortiertem Bauschutt im ersten Hauptversuch die meisten Stoffe, wie im Vorversuch, zu fast gleichen Teilen auf die Fraktionen 1-3 verteilen. Das Abwassersediment beinhaltet einen relativ hohen Anteil der Spurenelemente, während in das Abwasser, abgesehen vom Schwefel, weniger als 1 % aller untersuchten Elemente gelangen.

Bei der Aufbereitung von Betonabbruch (Tab. 6-11) im Hauptversuch 1b ist die Verteilung der Elemente auf die anorganischen Fraktionen 1, 2 und 3 nicht so gleichmäßig wie bei den entsprechenden Fraktionen des aufbereiteten Bauschutts. Zink, Blei Chrom und Kupfer sind zu einem relativ hohen Prozentsatz im Abwassersediment zu finden, während in das Abwasser, abgesehen vom Schwefel, wiederum weniger als 1 % aller untersuchten Elemente gelangen.

Bei der Aufbereitung von **Betonabbruch** verteilen sich die einzelnen Elemente im Hauptversuch 1b folgendermaßen auf die Produkte der Anlage:

Tab. 6-11: Prozentuelle Verteilung der Stoffe auf die Produkte der Anlage und ihre Unsicherheit (Hauptversuch 1b, Input. Betonabbruch)

| Stoffe % | Fraktion 1 (16-32 mm) | Fraktion 2 (4-16 mm) | Fraktion 3 (0-4 mm) | Eisen-schrott | Leichtgut | Abwasser-sediment | Ab-wasser | Σ quer (gerundet) |
|----------|-----------------------|----------------------|---------------------|---------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|
| S | 23±4 | 31±2 | 27±2 | n.b. | n.b. | 13±4 | 6,7± | 100 |
| TC | 22±1 | 42±1 | 29±1 | n.b. | 0,8 | 5,8±0,4 | n.b. | 100 |
| TIC | 20±2 | 46±3 | 29±3 | n.b. | 0,04 | 5,6±0,5 | n.b. | 100 |
| TOC | 38±19 | 13±7 | 33±25 | n.b. | 6,9 | 8,9±4 | 0,5± | 100 |
| Si | 26±4 | 40±6 | 34±5 | n.b. | 0,2 | n.b. | n.b. | 100 |
| Ca | 23±1 | 42±1 | 29±1 | n.b. | 0,05 | 6,2±0,5 | 0,3± | 100 |
| Al | 21±3 | 32±4 | 26±3 | n.b. | 0,2 | 22±5 | 0,05 | 100 |
| Fe | 11±3 | 17±4 | 14±3 | 41 | 0,08 | 9,9±5 | 0,0004 | 100 |
| Zn | 9,6±7 | 24±n.b. | 19±18 | n.b. | 0,6 | 47±22 | <0,016 | 100 |
| Pb | 28±n.b. | 14±n.b. | 31±30 | n.b. | 0,5 | 26±30 | <0,015 | 100 |
| Cr | 19±2 | 33±5 | 25±4 | n.b. | 1 | 22±4 | 0,4± | 100 |
| Cu | 17± n.b. | 34± n.b. | 21± n.b. | n.b. | 0,3 | 27±2 | 0,9± | 100 |
| Cd | 18±3 | 39±8 | 24±4 | n.b. | 4,6 | 15±8 | <0,12 | 100 |
| Hg | 19±7 | 34±8 | 23±7 | n.b. | 0,8 | 24±5 | <1,1 | 100 |

n.b. nicht bestimmt

6.3.4 Anreicherung

Die Berechnung der Anreicherung ist in Kapitel 5.3.4 beschrieben.

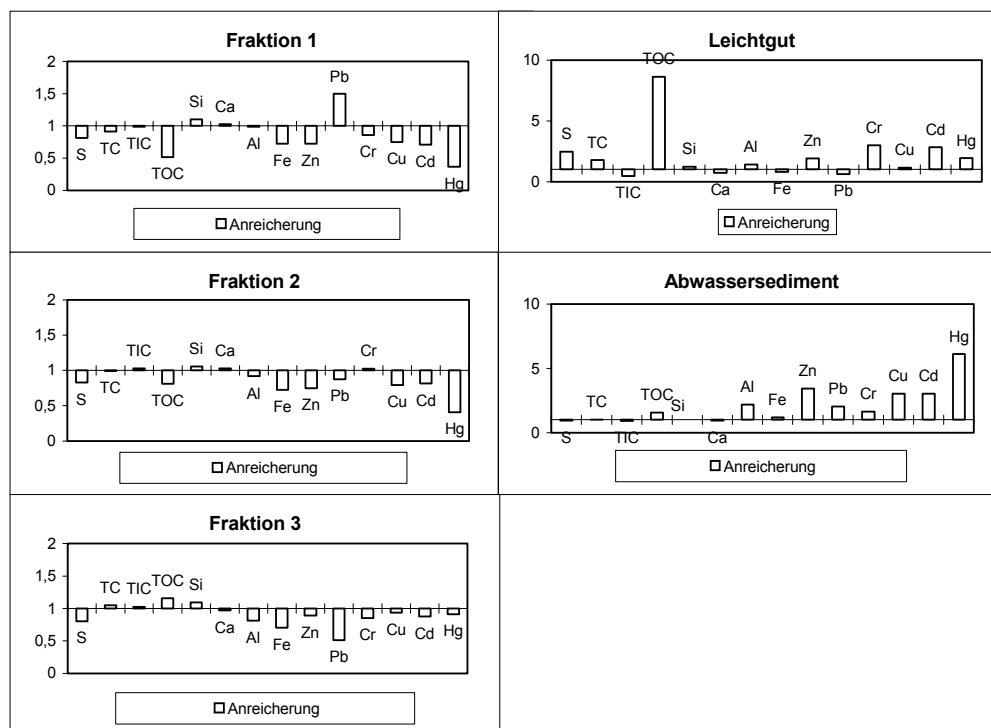


Abb. 6-1: Anreicherung der untersuchten Elemente in den Sortierfraktionen bei der Aufbereitung von vorsortiertem Bauschutt im Hauptversuch 1a

In den Fraktionen 1, 2 und 3 ist eine Abminderung des Schwefels und nahezu aller Spurenelemente zu erkennen. Am auffälligsten ist die Abminderung von Quecksilber in Fraktion 1 und 2. Nur das Blei wird in der Fraktion 1 geringfügig angereichert (Faktor 1,5). Der organische Kohlenstoff wird um den Faktor 8,6 im Leichtgut angereichert, wohingegen vor allem die Spurenelemente im Abwassersediment angereichert vorliegen und zwar Zink, Kupfer und Cadmium um den Faktor 3, und Quecksilber um den Faktor 6.

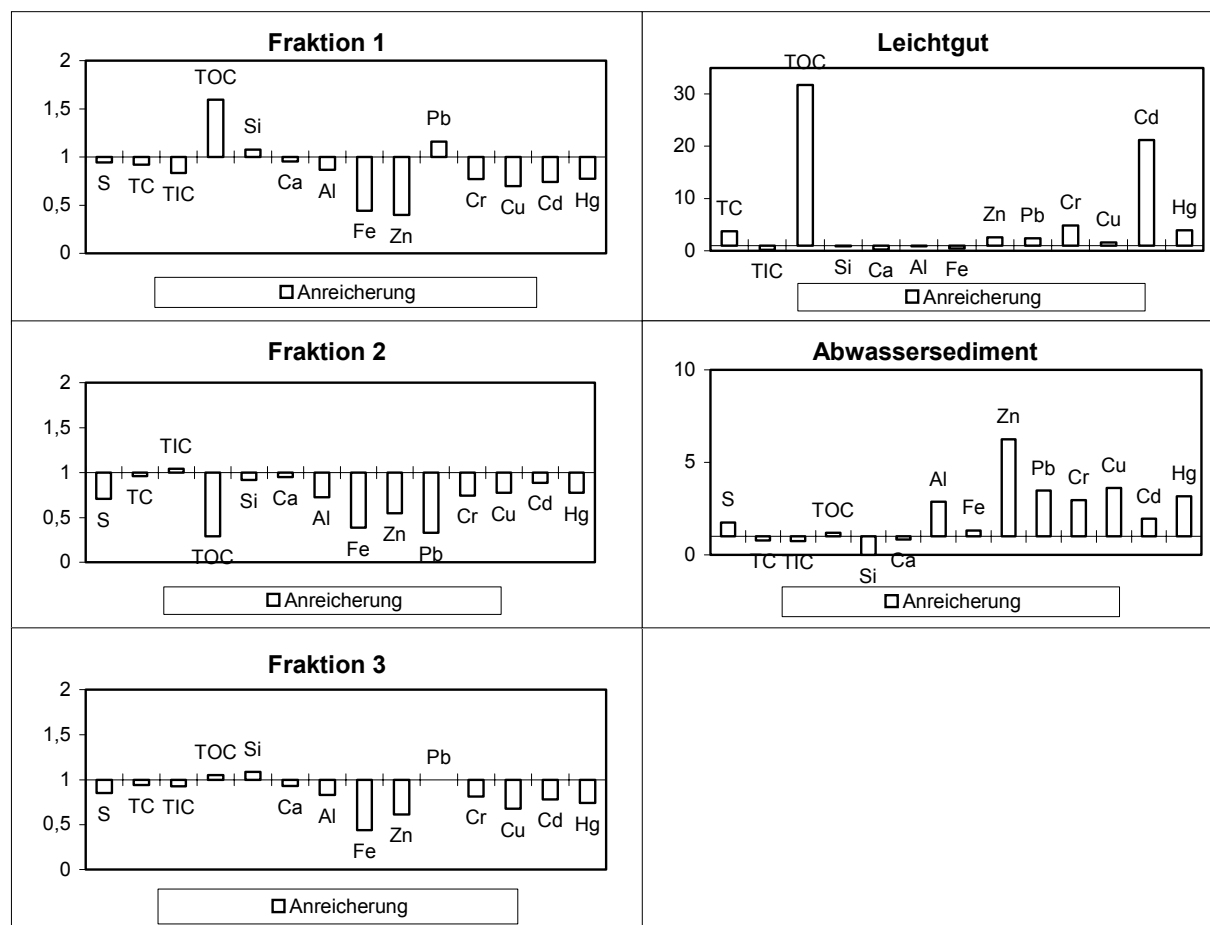


Abb. 6-2: Anreicherung der untersuchten Elemente in den Sortierfraktionen bei der Aufbereitung von Betonabbruch im Hauptversuch 1b

Ebenso wie beim Bauschutt ist beim Betonabbruch eine Abminderung der Spurenelemente in den Fraktionen 1, 2 und 3 zu erkennen. Das Blei wird in Fraktion 1 leicht angereichert, wogegen in Fraktion 2 nur ein Drittel der ursprünglichen Bleikonzentration des Ausgangsmaterials vorliegt. Organischer Kohlenstoff ist im Leichtgut um den Faktor 31 angereichert, Cadmium um den Faktor 21. Im Abwassersediment wiederum findet eine Anreicherung der Spurenelemente statt und zwar bei Zink um den Faktor 6, bei Blei, Chrom, Kupfer und Quecksilber um den Faktor 3.

7 ZWEITER HAUPTVERSUCH ZUR VERIFIZIERUNG DER BISHERIGEN ERGEBNISSE

Der zweite Hauptversuch hatte zum Ziel, die bisherigen Ergebnisse zu verifizieren und die Bandbreite der Resultate abzusichern. Die praktische Durchführung erfolgte wie im ersten Hauptversuch durch repräsentative Beprobung der Produkte von **vorsortiertem Bauschutt (Hauptversuch 2a)** bzw. **aufbereitetem Betonabbruch (Hauptversuch 2b)**.

7.1 Güterflüsse des zweiten Hauptversuches

Zunächst wurden, analog den vorangehenden Versuchen, die während der Versuchsdauer anfallenden Gütermengen bestimmt. Die Aufbereitung des vorsortierten Bauschutts dauerte rund 70 Minuten, die des Betonabbruchs rund 60 Minuten.

7.1.1 Durchführung der Messungen

Die Massen der festen Güter wurden gemäß Kapitel 5.1.1 erfaßt. Die Abwassermasse wurde wiederum mit einem Durchflußmeßgerät für teil- und vollgefüllte Kanäle ermittelt. Die Meßtoleranzen können aufgrund der ungünstigen Lage der einzig möglichen Meßstelle bis zu plus/minus 20 % betragen. Im Gegensatz dazu konnte beim zweiten Hauptversuch der Wasserverbrauch der Anlage mit hoher Genauigkeit gemessen werden. Die Messung wurde von der Firma Panametrics mit einem Ultraschall-Durchflußmeßgerät durchgeführt.

7.1.2 Ergebnisse

Tab. 7-1: Güterflüsse von Hauptversuch 2a: vorsortierter Bauschutt

| | Güterflüsse feucht [t/h] | Wassergehalt [g/100g FS] | Güterflüsse trocken [t/h] | Wasser [t/h] |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------|
| Inputgüter | | | | |
| vorsortierter Bauschutt | 75 | 11 | 67 | 8,3 |
| Wasser | 300±3 | - | - | 300±3 |
| Summe (gerundet) | 370-380 | - | 67 | 310 |
| Outputgüter | | | | |
| Eisenschrott | 0,13 | n.b. | 0,13 | n.b. |
| Holz etc. | 0,05 | n.b. | 0,05 | n.b. |
| Leichtgut | 3,8 | 32 | 2,6 | 1,2 |
| Abwasser | 130-190 | - | - | 130-190 |
| Abwassersediment (TS) | 2,5-3,7 | - | 2,5-3,7 | - |
| Fraktion 1 (16-32 mm) | 15 | 9 | 14 | 1,3 |
| Fraktion 2 (4-16 mm) | 27 | 9 | 25 | 2,5 |
| Fraktion 3 (0-4 mm) | 25 | 20 | 20 | 5,0 |
| Summe (gerundet) | 200-270 | - | 64-65 | 140-200 |

n.b.....nicht bestimmt

Tab. 7-2: Güterflüsse von Hauptversuch 2b: Betonabbruch

| | Güterflüsse feucht [t/h] | Wassergehalt [g/100g FS] | Güterflüsse trocken [t/h] | Wasser [t/h] |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------|
| Inputgüter | | | | |
| Betonabbruch | 45 | 3,4 | 44 | 1,5 |
| Wasser | 300±3 | - | - | 300±3 |
| Summe (gerundet) | 340-350 | - | 44 | 300 |
| Outputgüter | | | | |
| Eisenschrott | 0,1 | n.b. | 0,1 | n.b. |
| Holz etc. | 0,001 | n.b. | 0,001 | n.b. |
| Leichtgut | 0,5 | 21 | 0,4 | 0,1 |
| Abwasser | 180-270 | - | - | 180-270 |
| Abwassersediment (TS) | 2,0-3,0 | - | 2,0-3,0 | - |
| Fraktion 1 (16-32 mm) | 9,4 | 4,2 | 9,0 | 0,40 |
| Fraktion 2 (4-16 mm) | 20 | 5,4 | 19 | 1,1 |
| Fraktion 3 (0-4 mm) | 16 | 17 | 13 | 2,7 |
| Summe (gerundet) | 230-320 | - | 43-44 | 180-270 |

n.b.....nicht bestimmt

Die Diskrepanz zwischen den Input- und Outputflüssen der feuchten Güter (siehe Tab. 7-1 und Tab. 7-2 Spalte 2) ist auf den im Vergleich zum Zulauf geringen gemessenen Abwasserfluß zurückzuführen. Ein Teil des zugeführten Wassers verläßt die Anlage beim Austrag der einzelnen Fraktionen aus der Setzmaschine bzw. dem Schöpfrad, verrinnt und versickert schließlich auf dem Anlagenareal und kann daher an der Meßstelle für das Abwasser nicht erfaßt werden.

7.2 Zusammensetzung der Produkte der Anlage (Hauptversuch 2)

Die **Probenahme** der Outputgüter, die **Analytik** zur Bestimmung der Stoffkonzentrationen und die **statistische Auswertung** der Ergebnisse erfolgte gemäß der **Beschreibung in Kapitel 5.2 und 5.3**.

Tab. 7-3: Probenahme der Outputgüter

| Gut | entnommene Probenzahl | | davon analysiert | Analyse pro Probe und Stoff |
|------------------|-----------------------|--------------|------------------|-----------------------------|
| | Sortierter Bauschutt | Betonabbruch | | |
| Fraktion 1 | 5 | 5 | 5 | 1 |
| Fraktion 2 | 5 | 5 | 5 | 1 |
| Fraktion 3 | 5 | 5 | 5 | 1 |
| Leichtgut | 5 | 1 | 5 bzw. 1 | 1 |
| Abwasser | 5 | 5 | 5 | 1 |
| Abwassersediment | 5 | 5 | 5 | 1 |

Die Analyse der Outputfraktionen bei der Aufbereitung von **vorsortiertem Bauschutt** ergab im Hauptversuch 2a folgende Stoffkonzentrationen:

Tab. 7-4: Mittelwerte und Unsicherheit der Stoffkonzentrationen der beprobten Güter in Hauptversuch 2a (Input: vorsortierter Bauschutt)

| Stoffe | Fraktion 1 (16-32 mm) | Fraktion 2 (4-16 mm) | Fraktion 3 (0-4 mm) | Leichtgut | Abwasserse- diment | Abwasser |
|---------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|---------------|-----------------------|-----------|
| Matrix | [g/kg TS] | | | [mg/l] | | |
| S | 1,6±0,54 | 1,3±0,2 | 1,4±0,2 | 3,8±0,4 | 2,4±0,5 | 76±32 |
| TC | 54±4 | 59±6 | 59±6 | 210±90 | 98±23 | n.b. |
| TIC | 53±5 | 52±10 | 47±8 | 22±8 | 47±6 | n.b. |
| TOC | 1,8±1 | 7±6 | 11±3 | 190±95 | 51±25 | 13±7 |
| Si | 170±10 | 170±16 | 190±13 | 170±8 | 170 | n.b. |
| Cl | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | 16±5 |
| Ca | 160±9 | 160±19 | 140±18 | 100±17 | 160±18 | 160±120 |
| Al | 15±4 | 15±5 | 11±3 | 21±6 | 20±3 | 0,13±0,08 |
| Fe | 15±5 | 16±6 | 16±5 | 20±5 | 20±3 | <0,01 |
| Spuren | [mg/kgTS] | | | [µg/l] | | |
| Zn | 35±8 | 34±8 | 48±5 | 65±9 | 200±91 | <4 |
| Pb | 30±54 | 16±15 | 25±10 | 46±37 | 75±11 | <1 |
| Cr | 24±3 | 25±9 | 25±10 | 110±22 | 41±7 | 30±23 |
| Cu | 16±3 | 21±6 | 22±6 | 30±7 | 45±4 | 23±17 |
| Cd | 0,12±0,01 | 0,11±0,005 | 0,13±0,01 | 0,2±0,07 | 0,31±0,08 | <0,05 |
| Hg | 0,11±0,07 | 0,17±0,08 | 0,47±0,31 | 0,7±0,0,3 | 3,1±1,7 | <0,1 |

n.b. nicht bestimmt

Die Analyse der Outputfraktionen bei der Aufbereitung von **Betonabbruch** ergab im zweiten Hauptversuch folgende Stoffkonzentrationen:

Tab. 7-5: Mittelwerte und Unsicherheit der Stoffkonzentrationen der beprobten Güter in Hauptversuch 2b (Input: Betonabbruch)

| Stoffe | Fraktion 1 (16-32 mm) | Fraktion 2 (4-16 mm) | Fraktion 3 (0-4 mm) | Leichtgut | Abwasserse- diment | Abwasser |
|---------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|---------------|-----------------------|-----------|
| Matrix | [g/kg TS] | | | [mg/l] | | |
| S | 1,8±0,9 | 1,4±0,6 | 1,4±0,3 | 3,8 | 2,8±1,0 | 18±6 |
| TC | 78±10 | 83±6 | 84±11 | 80 | 83±10 | n.b. |
| TIC | 75±9 | 81±7 | 82±11 | 59 | 68±12 | n.b. |
| TOC | 3±1,8 | 2,7±1,3 | 2,5±1,7 | 21 | 15±6 | 3,4±2,1 |
| Si | 120±21 | 110±16 | 120±26 | 130 | 112 | n.b. |
| Cl | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | 6,7±3 |
| Ca | 230±16 | 230±15 | 220±9 | 200 | 210±9 | 54±39 |
| Al | 4,8±2 | 4,4±1,2 | 4,4±1,0 | 7,8 | 13±3 | 0,34±0,35 |
| Fe | 6,4±2,2 | 5,3±1,9 | 5,9±1,8 | 9,0 | 11±3 | 0,006 |
| Spuren | [mg/kgTS] | | | [µg/l] | | |
| Zn | 27±14 | 44±66 | 28±8 | 36 | 70±17 | <1 |
| Pb | 8,5±12 | 42±97 | 8,8±8,4 | 6,8 | 23±4 | <1 |
| Cr | 12±5 | 11±5 | 15±5 | 114 | 32±7 | 5±0,9 |
| Cu | 7,3±2,8 | 17±24 | 12±6 | 17 | 28±9 | 10±9 |
| Cd | 0,15±0,06 | 0,1±0,08 | 0,11±0,04 | 0,17 | 0,31±0,04 | <0,05 |
| Hg | 0,02±0,006 | 0,04±0,04 | 0,04±0,04 | 0,04 | 0,14±0,04 | <0,1 |

n.b. nicht bestimmt

Die Stoffkonzentrationen der einzelnen Produkte der Aufbereitung von **vorsortiertem Bauschutt** sind sehr ähnlich den Analyseergebnissen des Hauptversuches 1a. Ausnahmen bilden Quecksilber und Kalzium. Ersteres ist in der Fraktion 3 5mal höher konzentriert als im Hauptversuch 1a, zweiteres ist im Hauptversuch 1a rund ein viertel geringer konzentriert. Für den Input **Betonabbruch** liegen die Gehalte an Spurenelementen allgemein tiefer als in den vergleichbaren Outputfraktionen des Bauschutts.

7.3 Verteilung der Stoffe bei der Aufbereitung und Berechnung der Inputzusammensetzung

7.3.1 Stoffflüsse

Bei der Aufbereitung von „**vorsortiertem Bauschutt**“ fließen im Hauptversuch 2a folgende Stoffströme durch die Anlage:

Tab. 7-6: Mittelwerte der Stoffflüsse durch die Aufbereitungsanlage (Hauptversuch 2a vorsortierter Bauschutt)

| Stoffe | Bauschutt berechnet | Fraktion 1 (16-32 mm) | Fraktion 2 (4-16 mm) | Fraktion 3 (0-4 mm) | Leichtgut | Abwasser-sediment | Abwasser | Eisen-schrott |
|--------|---------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|-----------|-------------------|----------|---------------|
| | | [kg/h] | | | | | | |
| Matrix | = Σ AbisG | A | B | C | D | E | F | G |
| S | 110 | 22 | 32 | 27 | 10 | 7,3 | 12 | - |
| TC | 4.200 | 740 | 1.400 | 1.200 | 550 | 300 | n.b. | - |
| TIC | 3.100 | 710 | 1.300 | 930 | 57 | 150 | n.b. | - |
| TOC | 1.100 | 24 | 160 | 220 | 490 | 160 | 2,1 | - |
| Si | 11.000 | 2.300 | 4.200 | 3.800 | 440 | 510 | n.b. | - |
| Ca | 9.800 | 2.200 | 3.900 | 2.800 | 260 | 500 | 25 | - |
| Al | 900 | 210 | 360 | 230 | 54 | 62 | 0,02 | - |
| Fe | 1.200 | 210 | 400 | 330 | 51 | 65 | <0,002 | 130 |
| | | [g/h] | | | | | | |
| Spuren | | | | | | | | |
| Zn | 3.100 | 480 | 850 | 940 | 170 | 630 | <0,6 | - |
| Pb | 1.700 | 410 | 400 | 500 | 120 | 230 | <0,2 | - |
| Cr | 1.800 | 330 | 630 | 480 | 280 | 130 | 4,9 | - |
| Cu | 1.400 | 220 | 520 | 430 | 76 | 140 | <3,8 | - |
| Cd | 8,3 | 1,6 | 2,8 | 2,5 | 0,48 | 0,95 | <0,008 | - |
| Hg | 26 | 1,5 | 4,1 | 9,2 | 1,8 | 9,7 | <0,016 | - |

n.b.....nicht bestimmt

Während des Hauptversuches 2a durchliefen die Anlage bei der Aufbereitung von **vorsortiertem Bauschutt** in einer Stunde rund 10 Tonnen Kalzium, 11 Tonnen Silizium, 1 Tonne organischer Kohlenstoff, rund 1,2 Tonnen Eisen und 0,9 Tonnen Aluminium. Sie waren begleitet von Spurenelementen wie Blei (1,7 kg), Zink (3,1 kg) und Chrom (1,8 kg).

Bei der Aufbereitung von „**Betonabbruch**“ fließen im Hauptversuch 2b folgende Stoffströme durch die Anlage:

Tab. 7-7: Mittelwerte der Stoffflüsse durch die Aufbereitungsanlage (Hauptversuch 2b Betonabbruch)

| Stoffe | Betonabbruch berechnet | Fraktion 1 (16-32 mm) | Fraktion 2 (4-16 mm) | Fraktion 3 (0-4 mm) | Leicht- gut | Abwasser- sediment | Ab- wasser | Eisen- schrott |
|--------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|----------------|-----------------------|---------------|-------------------|
| [kg/h] | | | | | | | | |
| Matrix | = Σ A bis G | A | B | C | D | E | F | G |
| S | 74 | 16 | 27 | 18 | 1,5 | 6,9 | 3,9 | |
| TC | 3.600 | 700 | 1.600 | 1.100 | 32 | 210 | n.b. | |
| TIC | 3.500 | 670 | 1.600 | 1.100 | 24 | 170 | n.b. | |
| TOC | 160 | 27 | 50 | 32 | 8 | 38 | 0,77 | |
| Si | 5.000 | 1.000 | 2.100 | 1.600 | 53 | 280 | n.b. | |
| Ca | 9.900 | 2.000 | 4.400 | 2.800 | 80 | 530 | 12 | |
| Al | 220 | 43 | 85 | 58 | 3,1 | 31 | 0,076 | |
| Fe | 370 | 57 | 100 | 77 | 3,6 | 27 | <0,0013 | 100 |
| [g/h] | | | | | | | | |
| Spuren | | | | | | | | |
| Zn | 1.600 | 240 | 850 | 370 | 14 | 180 | <0,7 | |
| Pb | 1.000 | 80 | 800 | 120 | 3 | 60 | <0,2 | |
| Cr | 600 | 110 | 220 | 200 | 46 | 80 | 1,0 | |
| Cu | 600 | 65 | 330 | 150 | 7 | 70 | 2,2 | |
| Cd | 5,5 | 1,3 | 2,0 | 1,4 | 0,07 | 0,77 | <0,011 | |
| Hg | 1,9 | 0,19 | 0,78 | 0,55 | 0,015 | 0,34 | <0,022 | |

n.b.....nicht bestimmt

Während des Hauptversuches 2b durchliefen die Anlage bei der Aufbereitung von **Betonabbruch** in einer Stunde rund 10 Tonnen Kalzium, 5 Tonnen Silizium, 0,2 Tonnen organischer Kohlenstoff, rund 0,4 Tonnen Eisen und 0,2 Tonnen Aluminium. Sie waren begleitet von Spurenelementen wie Blei (1 kg), Zink (1,6 kg) und Chrom (0,6 kg).

7.3.2 Berechnete Zusammensetzung des Inputs

Die folgenden Tabellen geben die Zusammensetzung des **im zweiten Hauptversuch** aufbereiteten vorsortierten Bauschutts (Tab. 7-8) und Betonabbruchs (Tab. 7-9) wieder; sie wurde sie wurde nach Gleichung 5-2 aus der Summe der jeweiligen Stoffflüsse (Tab. 7-6 und Tab. 7-7) und der pro Stunde aufbereiteten Mengen (Tab. 7-1 und Tab. 7-2) berechnet.

Es ergibt sich folgende Zusammensetzung für den Input „**vorsortierter Bauschutt**“ der Anlage:

Tab. 7-8: Aus dem Output berechnete Zusammensetzung des vorsortierten Bauschutts (Hauptversuch 2a)

| Stoff | vorsortierter Bauschutt (Hauptversuch 2a) | | |
|-----------------------|---|--------------|---------------|
| | Mittelwert | obere Grenze | untere Grenze |
| Matrixelemente | [g/kg] | | |
| S | 1,0 | 1,8 | 1,1 |
| TC | 55 | 64 | 47 |
| TIC | 41 | 48 | 35 |
| TOC | 14 | 21 | 7 |
| Si | 140 | 150 | 130 |
| Ca | 130 | 140 | 120 |
| H ₂ O | 110 | 140 | 90 |
| Al | 12 | 15 | 8 |
| Fe | 16 | 20 | 11 |
| Spurenelemente | [mg/kg] | | |
| Zn | 41 | 50 | 30 |
| Pb | 22 | 41 | 3 |
| Cr | 25 | 32 | 17 |
| Cu | 18 | 23 | 14 |
| Cd | 0,11 | 0,12 | 0,10 |
| Hg | 0,35 | 0,55 | 0,15 |

Es ergibt sich folgende Zusammensetzung für den Input „**Betonabbruch**“ der Anlage:

Tab. 7-9: Aus dem Output berechnete Zusammensetzung des aufbereiteten Betonabbruchs (Hauptversuch 2b)

| Stoff | Betonabbruch (Hauptversuch 2b) | | |
|-----------------------|--------------------------------|--------------|---------------|
| | Mittelwert | obere Grenze | untere Grenze |
| Matrixelemente | [g/kg] | | |
| S | 1,6 | 2,2 | 1,0 |
| TC | 80 | 85 | 71 |
| TIC | 77 | 85 | 68 |
| TOC | 3,5 | 5 | 1,5 |
| Si | 110 | 120 | 85 |
| Ca | 220 | 230 | 200 |
| H ₂ O | 34 | 40 | 30 |
| Al | 4,8 | 6,1 | 3,4 |
| Fe | 8,1 | 10 | 6,1 |
| Spurenelemente | [mg/kg] | | |
| Zn | 36 | 70 | 2,0 |
| Pb | 23 | 69 | 0 |
| Cr | 14 | 18 | 8,4 |
| Cu | 14 | 27 | 0,7 |
| Cd | 0,12 | 0,18 | 0,06 |
| Hg | 0,04 | 0,07 | 0,01 |

7.3.3 Transferkoeffizienten

Die Transferkoeffizienten und ihre Unsicherheit wurden nach den Gleichungen 5.3 bis 5.5 berechnet. Zur übersichtlicheren Darstellung wurden die Transferkoeffizienten und deren geschätzte Unsicherheiten mit 100 multipliziert und so als prozentuelle Verteilung der Stoffe in den folgenden Tabellen angeführt.

Bei der Aufbereitung von „**vorsortiertem Bauschutt**“ verteilen sich die einzelnen Elemente im Hauptversuch 2a folgendermaßen auf die Produkte der Anlage:

Tab. 7-10: Prozentuelle Verteilung der Stoffe auf die Produkte der Anlage und ihre Unsicherheit (Hauptversuch 2a, Input: vorsortierter Bauschutt)

| Stoffe % | Fraktion 1 (16-32 mm) | Fraktion 2 (4-16 mm) | Fraktion 3 (0-4 mm) | Eisen-schrott | Leicht-gut | Abwasser-sediment | Abwasser | Σ quer gerundet) |
|----------|-----------------------|----------------------|---------------------|---------------|------------|-------------------|----------|------------------|
| S | 20±4 | 29±3 | 24±2 | n.b. | 9±1 | 6,7±1 | 11±3 | 100 |
| TC | 18±1 | 35±2 | 28±2 | n.b. | 13±3 | 7,3±1 | n.b. | 100 |
| TIC | 23±2 | 41±4 | 30±3 | n.b. | 1,8±0,5 | 4,7±0,5 | n.b. | 100 |
| TOC | 2,2±1 | 15±8 | 21±5 | n.b. | 46±10 | 15±5 | 0,2±0,1 | 100 |
| Si | 21±1 | 38±2 | 33±2 | n.b. | 3,9±0,2 | 4,6±3 | n.b. | 100 |
| Ca | 23±1 | 41±2 | 28±2 | n.b. | 2,7±0,3 | 5,0±0,5 | 0,26±0,1 | 100 |
| Al | 23±4 | 40±7 | 25±5 | n.b. | 6,0±1 | 6,8±1 | 0,002 | 100 |
| Fe | 18±5 | 34±7 | 27±6 | 11 | 4,3±1 | 5,5±1 | <0,001 | 100 |
| Zn | 16±2 | 28±4 | 31±3 | n.b. | 5,5±1 | 21±5 | <0,021 | 100 |
| Pb | 25±3 | 24±14 | 30±12 | n.b. | 7,2±5 | 14±5 | <0,01 | 100 |
| Cr | 18±6 | 34±7 | 26±2 | n.b. | 15±3 | 6,9±1 | 0,26±0,1 | 100 |
| Cu | 16±3 | 38±5 | 31±5 | n.b. | 5,5±1 | 10±1 | <0,27 | 100 |
| Cd | 19±1 | 33±1 | 30±2 | n.b. | 5,9±1 | 12±2 | <0,1 | 100 |
| Hg | 5,7±3 | 16±6 | 35±12 | n.b. | 6,8±3 | 37±11 | <0,06 | 100 |

n.b..... nicht bestimmt

Aus Tab. 7-10 ist zu entnehmen, daß sich bei der Aufbereitung von vorsortiertem Bauschutt die meisten Stoffe, wie auch im Vorversuch und im Hauptversuch 1a, fast zu gleichen Teilen auf die Fraktionen 1-3 aufteilen, während in das Abwasser, abgesehen vom Schwefel, weniger als 1 % aller untersuchten Elemente gelangen.

Bei der Aufbereitung von **Betonabbruch** verteilen sich die einzelnen Elemente im Hauptversuch 2b folgendermaßen auf die Produkte der Anlage:

Tab. 7-11: Prozentuelle Verteilung der Stoffe auf die Produkte der Anlage und ihre Unsicherheit (Hauptversuch 2b, Input: Betonabbruch)

| Stoffe % | Fraktion 1 (16-32 mm) | Fraktion 2 (4-16 mm) | Fraktion 3 (0-4 mm) | Eisen-schrott | Leicht-gut | Abwasser-sediment | Abwasser | Σ quer (gerundet) |
|----------|-----------------------|----------------------|---------------------|---------------|------------|-------------------|-------------|-------------------|
| S | 22±7 | 37±8 | 24±5 | n.b. | 2,1 | 9,4±3 | 5,3±2 | 100 |
| TC | 19±2 | 44±2 | 30±2 | n.b. | 0,88 | 5,7±0,5 | n.b. | 100 |
| TIC | 19±2 | 45±2 | 31±2 | n.b. | 0,68 | 4,9±0,6 | n.b. | 100 |
| TOC | 17±7 | 33±10 | 21±9 | n.b. | 5,4 | 24±7 | 0,5±0,3 | 100 |
| Si | 21±3 | 42±4 | 31±4 | n.b. | 1,1 | 5,6±n.b. | n.b. | 100 |
| Ca | 21±1 | 45±1 | 29±0,9 | n.b. | 0,81 | 5,4±0,2 | 0,12±0,1 | 100 |
| Al | 19±5 | 39±5 | 26±4 | n.b. | 1,4 | 14±3 | 0,03 | 100 |
| Fe | 16±5 | 28±7 | 21±6 | 27 | 0,98 | 7,3±2 | <0,001 | 100 |
| Zn | 15±>15 | 51±>50 | 22±>22 | n.b. | 0,87 | 11±>11 | <0,04 | 100 |
| Pb | 7,2±16 | 76±31 | 11±12 | n.b. | 0,26 | 5,4±7 | <0,02 | 100 |
| Cr | 17±5 | 34±8 | 30±7 | n.b. | 7,0 | 12±3 | 0,16±<0,001 | 100 |
| Cu | 10±6 | 53±26 | 25±15 | n.b. | 1,1 | 11±7 | 0,35±0,3 | 100 |
| Cd | 24±8 | 35±14 | 26±8 | n.b. | 1,2 | 14±3 | <0,20 | 100 |
| Hg | 10±4 | 42±17 | 29±16 | n.b. | 0,81 | 18±7 | <1,2 | 100 |

Da vom Leichtgut nur eine Mischprobe analysiert wurde, kann für dieses Produkt die Unsicherheit der Stoffverteilung nicht berechnet werden.

Bei der Aufbereitung von Betonabbruch ist die Verteilung der Elemente auf die anorganischen Fraktionen 1, 2 und 3 nicht so gleichmäßig wie bei den entsprechenden Fraktionen des aufbereiteten Bauschutts. Zink, Blei Chrom und Kupfer sind zu einem relativ hohen Prozentsatz im Abwassersediment zu finden, während in das Abwasser, abgesehen vom Schwefel, wiederum weniger als 1 % aller untersuchten Elemente gelangen.

Es fällt auf, daß die Verteilung der Spurenelemente, mit Ausnahme des Chroms, bei der Aufbereitung von Betonabbruch mit großer Unsicherheit behaftet ist.

7.3.4 Anreicherung

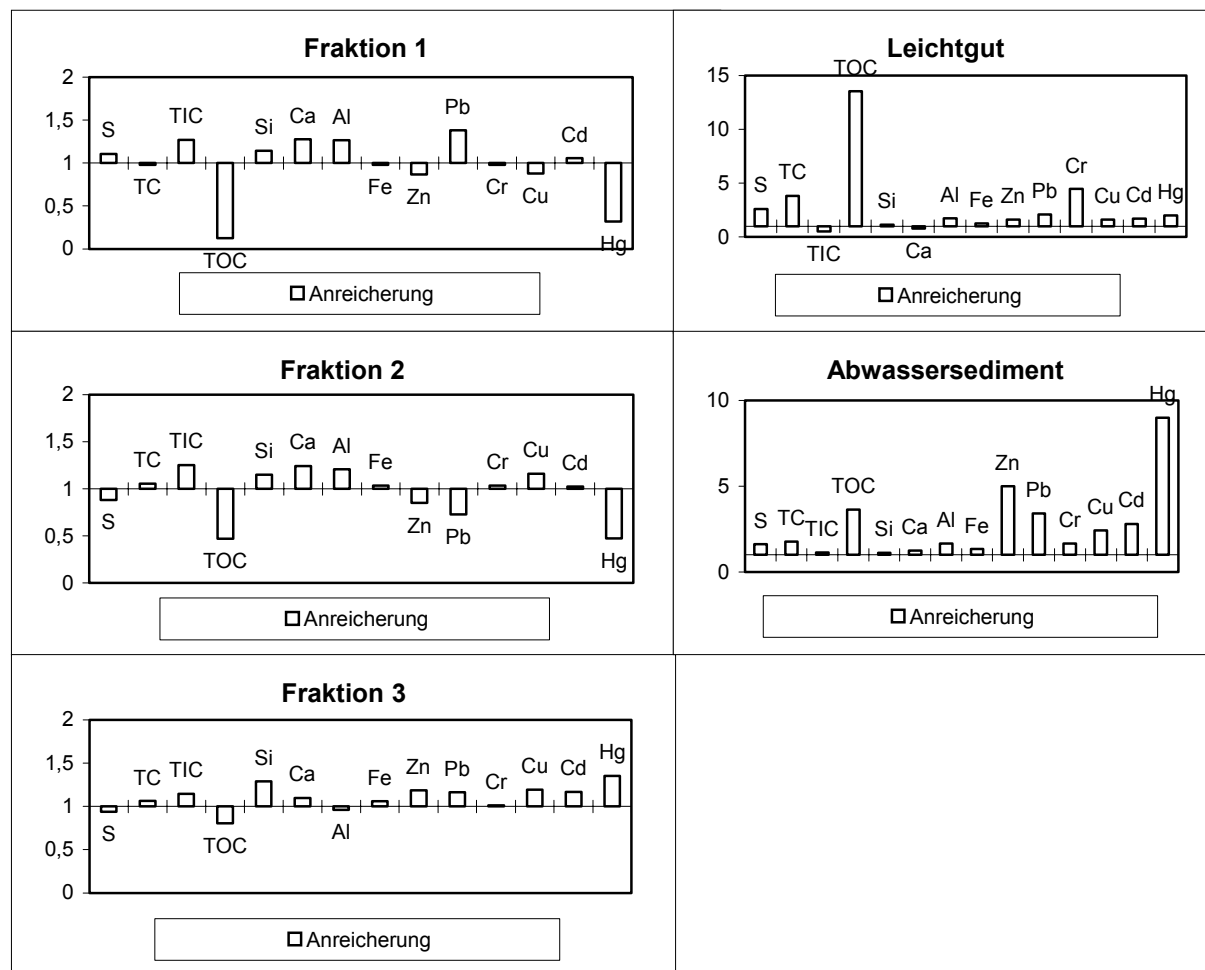


Abb. 7-1: Anreicherung der untersuchten Elemente in den Sortierfraktionen bei der Aufbereitung von vorsortiertem Bauschutt im Hauptversuch 2a

Abbildung 7-1 zeigt in Fraktion 1 und Fraktion 2 eine Abminderung von organischem Kohlenstoff und von Quecksilber. In den Fraktionen 1, 2 und 3 ist eine geringe Anreicherung einiger Spurenelemente zu erkennen, die allerdings den Faktor 1,2 kaum überschreiten. Der organische Kohlenstoff im Leichtgut ist rund 14 mal höher als im Eingangsmaterial, wohingegen im Abwassersediment vor allem die Spurenelemente angereichert vorliegen; Zink weist hier einen Anreicherungsfaktor von 5 und Quecksilber von 9 auf.

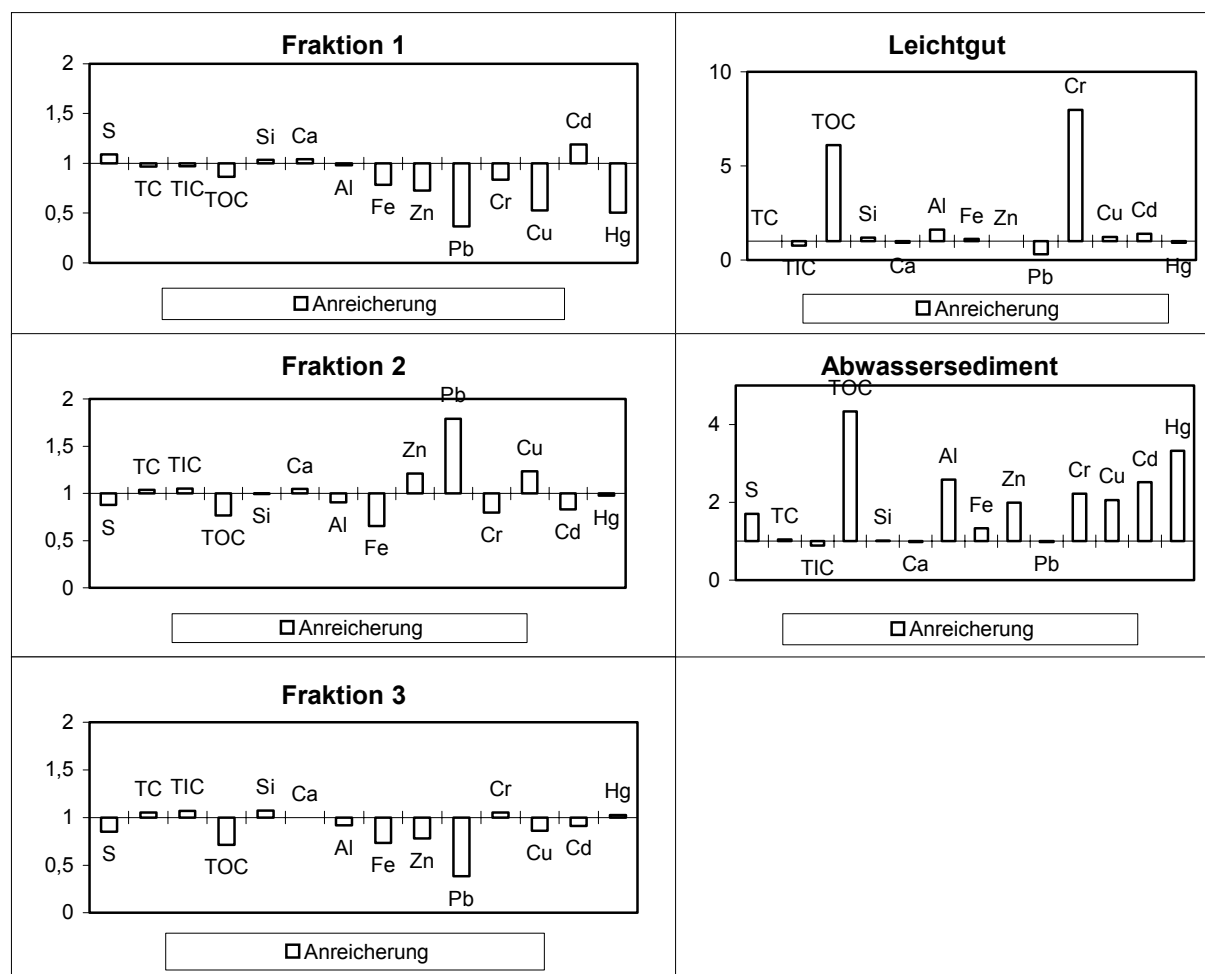


Abb. 7-2: Anreicherung der untersuchten Elemente in den Sortierfraktionen bei der Aufbereitung von Betonabbruch im Hauptversuch 2b

In den Fraktionen 1, 2 und 3 ist sowohl eine Abminderung des organischen Kohlenstoffes, als auch der Spurenelemente festzustellen. Eine Ausnahme bildet die Anreicherung von Blei in der Fraktion 2, dessen Konzentration allerdings, wie aus *Tab. 7-11* hervorgeht, mit starker Unsicherheit behaftet ist. Der organische Kohlenstoff wird ebenso wie bei der Aufbereitung von Bauschutt hauptsächlich im Leichtgut (Faktor 6) aber auch im Abwassersediment (Faktor 4) angereichert, die Spurenelemente reichern sich wiederum im Abwassersediment an, und zwar Chrom und Kupfer mit dem Faktor 2, Cadmium mit dem Faktor 2,5 und Quecksilber mit dem Faktor 3. Bemerkenswert ist die Anreicherung von Chrom mit dem Faktor 8 im Leichtgut.

8 VERGLEICH DER ERGEBNISSE MIT ARBEITEN ÜBER TROCKENE AUFBEREITUNGSVERFAHREN

In diesem Kapitel werden zunächst vier Arbeiten über trockene Aufbereitungsanlagen vorgestellt und anschließend mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit verglichen. *Alle Angaben über Elementgehalte in Sortierfraktionen von trockenen Anlagen stammen aus den zitierten Werken und wurden nicht im Labor des Umweltbundesamtes gemessen.*

8.1 Möglichkeiten zur Verbesserung der Umweltverträglichkeit aufbereiteter Hochbaurestmassen

Im Artikel „Möglichkeiten zur Verbesserung der Umweltverträglichkeit aufbereiteter Hochbaurestmassen“ (Sindt et al. 1997) wird über Versuche berichtet, die zum Ziel hatten, verschiedene Wege zur Schadstoffminimierung in Sekundärbaustoffen miteinander zu vergleichen. Die Schwerpunkte der Arbeit waren:

- A) die Untersuchung des Einflusses des Aufbereitungsverfahrens auf die Umweltverträglichkeit von Recyclingbaustoffen und
- B) die Untersuchung des Einflusses des Abbruchverfahrens auf die Qualität des Recyclingmaterials

Ad A)

Um den **Einfluß des Aufbereitungsverfahrens auf die Umweltverträglichkeit des daraus entstehenden Recyclingmaterials** zu untersuchen, wurden unsortierte Baurestmassen aus dem Abbruch von ähnlich zusammengesetzten Gebäuden in zwei Bauschutt aufbereitungsanlagen unterschiedlicher Konfiguration aufbereitet und charakterisiert. Es wurde ausschließlich Bauschutt aus dem Hochbau in die Untersuchung einbezogen, so daß eine Gegenüberstellung der Qualität der aus den Aufbereitungsanlagen gewonnenen Recyclingmaterialien stattfinden konnte.

Ausgewählt wurden eine mobile und eine stationäre Anlage.

Die **mobile Anlage** bestand aus einem Backenbrecher und einem Magnetabscheider, ergänzt durch eine Handsortierung zur Entfernung grober Holz- und Metallteile. Des weiteren wurde die aufbereitete Fraktion 0-100 mm auf 8 mm abgesiebt.

Die **Massenbilanz der mineralischen Fraktion der mobilen Anlage** ergab, daß rund 26 % des aufbereiteten Materials in der Fraktion 0-8 mm und rund 74 % in der Fraktion 8-100 mm zu finden waren.

Die untersuchte **stationäre Anlage** besteht aus einem Backenbrecher, zwei Magnetabscheidern, einer Handauslesestation zur Entfernung von Holz, Kabeln Gipssteinen, Nichteisenmetallen und Kunst- bzw. Leichtstoffen, einer Trommelsiebmaschine sowie einem Absaugecontainer zum Abscheiden von Leichtstoffen. Ferner findet eine Vorabsiebung statt, die es ermöglicht, die feine, im Recyclingmaterial unerwünschte Fraktion, vor der Zerkleinerung abzuscheiden. Je nach den zur Verfügung stehenden Verwendungsoptionen wird diese feine Fraktion (0-25 mm) auf 4 mm abgesiebt.

Die **Massenbilanz der mineralischen Fraktion der stationären Anlage** ergab eine Verteilung durch die Vorabsiebung von rund 11 % auf die Fraktion 0-4 mm und rund 29 % auf die Fraktion 4-25 mm. Nach dem Brecher wurden rund 28 % des Inputs auf die Fraktion 0-45 mm und rund 33 % auf die Fraktion >45 mm verteilt.

Tab. 8-1: Vergleich der Massenbilanzen der mobilen bzw. stationären Aufbereitungsanlage

| | Mineralischer Input [%] | Outputfraktionen [%] | | | | | |
|-------------------|--------------------------|-----------------------|----------|--------|---------|---------|--------|
| | | 0-8 mm | 8-100 mm | 0-4 mm | 4-25 mm | 0-45 mm | >45 mm |
| mobile Anlage | 100 | 25,9 | 74,1 | | | | |
| stationäre Anlage | 100 | | | 10,5 | 28,5 | 28,4 | 32,6 |

Die einzelnen Fraktionen beider Aufbereitungsanlagen wurden repräsentativ beprobt und hinsichtlich ausgewählter Metalle und organischer Schadstoffe untersucht. Die Analyseergebnisse sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Tab. 8-2: Stoffkonzentrationen in den Fraktionen

| Stoff Fraktionen | mobile Anlage | | stationäre Anlage | | | |
|---------------------|---------------|----------|-------------------|---------|---------|--------|
| | 0-8 mm | 8-100 mm | 0-4 mm | 4-25 mm | 0-45 mm | >45 mm |
| Blei [mg/kg] | 96,5 | 9,2 | 35 | 21,5 | 16 | 16 |
| Zink [mg/kg] | 390 | 48,9 | 133 | 65 | 84 | 26 |
| KW [mg/kg] | 138 | 63,9 | 432 | 222 | 153 | 28 |
| PAK [mg/kg] | 6,58 | 3,05 | 2,53 | 0,49 | 0,40 | 0,013 |

Bedeutung der Abkürzungen: KW = Kohlenwasserstoffe, PAK = polizyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

Zur Durchführung der Stoffbilanzierung wurden die Ergebnisse der Feststoffanalysen sowie der Massenbilanzen herangezogen. Die Resultate sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt.

Tab. 8-3: Vergleich der Stoffverteilungen der mobilen bzw. stationären Aufbereitungsanlage

| Stoff Fraktionen | mobile Anlage | | stationäre Anlage | | | |
|---------------------|---------------|----------|-------------------|---------|---------|--------|
| | 0-8 mm | 8-100 mm | 0-4 mm | 4-25 mm | 0-45 mm | >45 mm |
| Blei [%] | 79 | 21 | 19 | 31 | 23 | 27 |
| Zink [%] | 74 | 26 | 21 | 29 | 37 | 13 |
| KW [%] | 43 | 57 | 27 | 40 | 27 | 6 |
| PAK [%] | 43 | 57 | 51 | 27 | 22 | 1 |

Bedeutung der Abkürzungen: KW = Kohlenwasserstoffe, PAK = polizyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

Es zeigte sich, daß grundsätzlich die groben Fraktionen beider Anlagen in Bezug auf ihren Massenanteil (mobile Anlage 74 % Fraktion 8-100 mm, stationäre Anlage 33 % Fraktion >45 mm) geringe Schadstoffmengen enthalten. Fast alle Schadstoffe reichern sich in den feinen Fraktionen an, so daß durch Entfernung dieser belasteten Fraktionen (0-8 mm und 0-4 mm) sich der Gesamtschadstoffgehalt gezielt reduzieren läßt.

Bei weitergehender Fraktionierung der feinsten Anteile konnte bezüglich der Schadstoffgehalte dieser Trend nicht mehr beobachtet werden. Die Entfernung kleinerer Kornfraktionen scheint keinen wesentlichen Einfluß auf die Schadstoffgehalte der restlichen Fraktionen mehr zu haben.

Ad B)

Zur Untersuchung der **Einflüsse der Abbruchmethode auf die Umweltverträglichkeit aufbereiteten Recyclingmaterials** wurde ein Reihenhauskomplex in Massivbauweise, bestehend aus nahezu identisch aufgebauten Gebäuden, durch unterschiedliche Verfahren abgebrochen bzw. rückgebaut. Beim Rückbau wurden zum einen die im Recyclingmaterial unerwünschten nicht mineralischen Bestandteile wie etwa Holz, Metalle, Kunststoffe usw. entfernt. Darüber hinaus wurden die in der folgenden Tabelle angeführten Schadstoffquellen getrennt demontiert. Teilweise sind diese Schadstoffe in den Baustoffen aufgrund deren natürlicher stofflicher Zusammensetzung enthalten oder sie werden während der Herstellung, z. B. in Form von Zusatzstoffen, eingetragen. Teilweise reichern sie sich auf Grund der Nutzung in bestimmten Bauteilen an (z. B. Kamine).

Tab. 8-4: *Potentielle Schadstoffquellen in Gebäuden (Quelle: SINDT et al 1997)*

| Herkunft | relevante Schadstoffe |
|-----------------------|--------------------------------------|
| Natursteine | Schwermetalle |
| Gips | Sulfat, Schwermetalle |
| Asbest | Asbest |
| behandeltes Holz | Schwermetalle, Lindan, Phenole |
| Klebstoffe | Phenole, KW, organische Bestandteile |
| Dichtungsmasse | PCB |
| Teerpappe | KW, PAK, Phenole |
| techn. Installationen | PCB, Hg, Cd |
| Ruß | Schwermetalle, PAK |
| Staub | Schwermetalle |
| Brand | PAK, PCDD/PCDF |
| Unfälle - Nutzung | u. a. Öle, Säuren, Laugen |

Bedeutung der Abkürzungen: KW = Kohlenwasserstoffe, PCB = polychlorierte Biphenyle, PAK = polizyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, Hg = Quecksilber, Cd = Cadmium, PCDD/PCDF = polychlorierte dibenzo-Dioxine bzw. dibenzo-Furane.

Die jeweils anfallenden mineralischen Fraktionen wurden separat in der bereits beschriebenen mobilen Anlage vor Ort aufbereitet. Proben wurden entnommen und untersucht. Ein Vergleich der Untersuchungsergebnisse der Eluate zeigte, daß durch eine frühzeitige Vorsortierung und Trennung der Baurestmassen eine deutliche Qualitätsverbesserung des Recyclingmaterials erreicht werden kann. Chlorid-, Sulfat- und DOC (dissolved organic carbon) Konzentrationen im Eluat waren bei den aus der Abbruchfraktion stammenden Proben alle mehr als doppelt so hoch wie bei den aus dem Rückbau stammenden. Die organische Belastung des Recyclingmaterials aus dem Abbruch war 6 mal höher als in der aus dem Rückbau stammenden Probe. Durch eine Sortierung auf der Baustelle (Rückbau) kann demnach eine wesentlich bessere Entfrachtung des Materials erreicht werden als durch nachträgliche Maßnahmen.

Zusammenfassend wird festgehalten, daß

- **abbruchseitig** die im Bauschutt vorhandenen Schadstoffe durch getrennte Demontage belasteter Bauteile deutlich verringert werden können
- eine Schadstoffentfrachtung der Sortierfraktionen **durch die Aufbereitung** vor allem durch eine Absiebung der Feinfraktion (0-4 bzw. 0-8 mm) erreicht wird, in der sich die Schadstoffe überwiegend anreichern. Ab einer gewissen Korngröße (in der vorliegenden Untersuchung 4 mm) jedoch korreliert die Schadstoffverteilung nur noch geringfügig mit der Korngröße der Partikel.

8.2 Stoffflußanalyse einer Bauabfallsortieranlage BASORAG

In der Studie „Stoffflußanalyse der Bauabfallsortieranlage BASORAG“ (BASORAG 1991) wurde eine Baurestmassen-Sortieranlage bilanziert, in der jährlich rund 50.000 t vermischte Bauabfälle verarbeitet werden. Mit „vermischten Bauabfällen“ werden hier Abfälle bezeichnet, wie sie in erster Linie bei Neu- und Umbauten von Gebäuden anfallen, und die normalerweise in Mulden gesammelt werden. Von der Zusammensetzung her sind diese Abfälle am ehesten mit der in Österreich als Baustellenabfälle bezeichneten Abfallart vergleichbar. Von den gesamten aus den Sortierprozessen stammenden Fraktionen werden nur die mineralische Fraktion >320 mm und die Metalle als Recyclingmaterialien verwendet. Alle anderen Fraktionen werden deponiert bzw. verbrannt.

Das Ziel der Untersuchungen war, anhand einer genauen Mengenerfassung und einer repräsentativen Beprobung aller Sortierfraktionen während zweier Monate mit unterschiedlicher Bautätigkeit (Februar und April) folgende Fragen zu beantworten:

- wie setzt sich das angelieferte Muldengut bezüglich der Hauptbestandteile und der Spurenstoffe zusammen?
- wie ist die Trennwirkung der Anlage im Hinblick auf eine Wiederverwertung, bzw. optimale Entsorgung der verschiedenen Sortierfraktionen?
- ist eine Anreicherung bzw. Abminderung von problematischen Stoffen in den einzelnen Fraktionen zu erkennen?

Die untersuchte Sortieranlage umfaßte folgende Hauptelemente:

- **Vorsortierung** des grobstückigen Materials mittels Greifbagger.
- dreistufige **Siebanlage** (30/80/320 mm), wobei die Feinfraktionen 0-30 und 30-80 mm direkt abgetrennt werden.
- zwei **Handleseebänder** für die Fraktionen 80-320 mm (Entfernung der nicht-mineralischen Anteile) und die Fraktion >320 mm (verwertbare Stoffe wie Holz, Metalle, große Steine).

Massenbilanz

Die Mengenerhebung in den Monaten Februar und April 1990 ergab eine relativ konstante Aufteilung des Input auf die Sortierfraktionen:

Tab. 8-5: Massenbilanz der Sortieranlage BASORAG

| Sortierprozesse | Massen [Gew %] bezogen auf das gesamte Eingangsmaterial |
|---|---|
| Sortierprozeß + resultierende Fraktionen | |
| Vorauslese Total | 32 |
| Multikomponentenmaterial | 27 |
| Metalle | 2 |
| Beton und Steine | 2,5 |
| Holz | 0,5 |
| Siebsystem Total(0-80 mm) | 43 |
| Siebfr. 0-30 (mineralisch) | 30 |
| Siebfr. 30-80 (mineralisch) | 13 |
| Handauslese Fraktionen >80 mm | 25 |
| Siebfr. 80-320 mm (mineralisch) | 11 |
| Multikomponentenmaterial | 11 |
| mineralische Fraktion >320 mm | 2 |
| Metalle | 0,2 |
| Holz | 0,8 |

Multikomponentenmaterial = Papier, Kunststoffe etc.; Siebfr. = Siebfraktion

Stoffkonzentrationen

Zur chemischen Analyse wurden den einzelnen Fraktionen mengenproportional Proben entnommen und in verschiedenen Arbeitsschritten aufbereitet. Die Konzentrationen ausgewählter Elemente in einzelnen Fraktionen werden in der folgenden Tabelle dargestellt:

Tab. 8-6: Ausgewählte Stoffkonzentrationen einzelner Fraktionen BASORAG

| Stoffe | Siebfraktion (0-30 mm) | Siebfraktion (30-80 mm) | Siebfraktion (80-320 mm) | mineralische Fraktion (>320 mm) | Multikomponenten |
|--------------------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|------------------|
| Matrix [g/kg Trockensubstanz] | | | | | |
| S | 12,6 | 9,6 | 6,7 | <2 | 9,2 |
| TIC | 34,7 | 33,5 | 34,7 | 42 | 8,9 |
| TOC | 27,6 | 20,7 | 9,3 | 3,9 | 482 |
| Si | 208 | 227 | 231 | 229 | 32 |
| Cl | <1 | <1 | <1 | <1 | 27 |
| Ca | 143 | 145 | 148 | 162 | 42,3 |
| Al | 31,6 | 34,4 | 34,2 | 26,8 | 7,2 |
| Fe | 31,3 | 22,1 | 13,3 | 20 | 48,2 |
| Spuren [mg/kgTrockensubstanz] | | | | | |
| Zn | 1.725 | 155 | 83 | 37 | 2.060 |
| Pb | 549 | 111 | 32 | 14 | 920 |
| Cu | 783 | 319 | 33 | 11 | 2.200 |
| Cd | 1,5 | 0,5 | 0,2 | 0,1 | 32 |

Verteilung der Elemente

Zur Durchführung der Stoffbilanzierung wurden die Ergebnisse der Feststoffanalysen sowie der Massenbilanzen herangezogen. Die Resultate sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt.

Tab. 8-7: Prozentuelle Verteilung der Stoffe auf einzelne Fraktionen

| Stoffe | Siebfraktion (0-30 mm) | Siebfraktion (30-80 mm) | Siebfraktion (80-320 mm) | Mineralische Fraktion (>320 mm) | Multikomponenten |
|-------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|------------------|
| Matrix [%] | | | | | |
| S | 35 | 13 | 8 | n.n. | 43 |
| TIC | 41 | 19 | 18 | 7 | 16 |
| TOC | 4 | 1 | 0,6 | 0,2 | 91 |
| Si | 42 | 21 | 20 | 8 | 9 |
| Cl | n.n. | n.n. | n.n. | n.n. | ca.98 |
| Ca | 39 | 19 | 18 | 7 | 18 |
| Al | 39 | 20 | 19 | 6 | 13 |
| Fe | 18 | 6 | 3 | 1 | 31 |
| Spuren [%] | | | | | |
| Zn | 38 | 2 | 0,8 | 0,1 | 54 |
| Pb | 22 | 2 | 0,6 | 0,1 | 43 |
| Cu | 17 | 3 | 0,3 | 0,04 | 49 |
| Cd | 1,9 | 0,5 | 0,2 | 0,05 | 98 |

n.n.....die Konzentration liegt unterhalb der Nachweisgrenze

Aus den Elementfrachten aller Sortierfraktionen und der Gesamtmenge des während der Meßperiode angelieferten Eingangsmaterials konnte die chemische Zusammensetzung des Muldenguts berechnet werden.

Tab. 8-8: Berechnete chemische Zusammensetzung des Muldengutes BASORAG

| Stoffe | Periode Februar 1990 | Periode April 1990 |
|---------------|--------------------------------|--------------------|
| Matrix | [g/kg Trockensubstanz] | |
| S | 11 | 7 |
| TIC | 24 | 20 |
| TOC | 215 | 155 |
| Si | 142 | 119 |
| Cl | 17 | 5 |
| Ca | 105 | 85 |
| Al | 23 | 19 |
| Fe | 42 | 49 |
| Spuren | [mg/kg Trockensubstanz] | |
| Zn | 1.030 | 1.341 |
| Pb | 643 | 752 |
| Cu | 1.035 | 1.638 |
| Cd | 19 | 7 |

Anreicherung in den Fraktionen

Relativ deutlich angereichert werden die Elemente Kohlenstoff (organischer Kohlenstoff), Chlor, Cadmium sowie Brom und Bor in der Multikomponentenfraktion und organischer Kohlenstoff in der Holzfraktion. In den inertstoffähnlichen Fraktionen (Siebfraktionen >30 mm, Blöcke >320 mm) werden Silizium, Kalzium und Aluminium angereichert (Faktoren 1,5 bis 2), während der organische Kohlenstoff und die Schwermetalle massiv abgemindert (Abminderung 5 bis 100fach) werden.

Qualität der Fraktionen

Hinsichtlich der Qualität der **mineralischen Fraktionen** wurde gezeigt, daß die **Siebfraktionen >30 mm** die Anforderungen der TVA (Schweizerische Technische Verordnung über Abfälle) an Inertstoffe weitgehend erfüllen und dementsprechend auf Inertstoffdeponien abgelagert werden können. Die **Siebfraktion 0-30 mm** genügt den TVA-Anforderungen für Inertstoffe nicht; um diese Fraktion auf Inertstoffdeponien entsorgen zu können, müßte das Muldengut zuerst von Schadstoffen entfrachtet werden. Die **Fraktion >320 mm** kann in Anbetracht der sehr tiefen Schwermetallgehalte als Recyclingmaterial verwendet werden.

Die Fraktion „**Multikomponentenmaterial**“ besteht zu rund 50 % aus organischem Kohlenstoff und ist gemäß TVA als brennbare Fraktion einer Müllverbrennungsanlage zuzuführen.

Die gute Trennschärfe der Anlage erlaubt eine Verwertung der aussortierten **Metalle** durch den Altstoffhandel.

Die an der Sortieranlage BASORAG durchgeführte Stoffflussanalyse zeigte, daß unter den gegebenen Randbedingungen die Zielsetzung, möglichst hohe Anteile an wiederverwertbaren oder problemlos deponierbaren Materialien abzutrennen, nur unbefriedigend erreicht werden kann. Dies liegt nicht in erster Linie an der Anlage, sondern an der unbefriedigenden Qualität der angelieferten Bauabfälle. Das Hauptgewicht zukünftiger Maßnahmen muß daher auf der konsequenten Trennung der Bauabfälle bereits am Anfallsort liegen.

8.3 Stoffflußanalyse einer Sortieranlage für Bausperrgut SORTAG

In der Studie „Stoffflußanalyse einer Sortieranlage für Bausperrgut“ (BRUNNER & STÄMPFLI 1993) wird eine Anlage bilanziert, in der täglich rund 200t Muldengut, eine Abfallart, die der Zusammensetzung nach den Baustellenabfällen am ähnlichsten ist, aufbereitet wird. Die Anlage hat zum Ziel, die Abfälle einerseits in brennbares Material und andererseits in deponierbares und eventuell wieder als Kiesersatz geeignetes Material aufzutrennen. Das Ziel der durchgeführten Stoffflußanalyse war es, die Verteilung ausgewählter, wichtiger Elemente bei der Sortierung von Bausperrgut auf die verschiedenen Sortierfraktionen zu bestimmen. Damit sollte einerseits die Sortierung als Stoffverteilungsverfahren beurteilt werden, und andererseits sollten die Produkte in bezug auf ihre weitere Verwendung qualifiziert werden.

Die Sortieranlage der SORTAG wird mit vergleichsweise hohem technischem Aufwand betrieben; die angelieferten Abfälle werden insgesamt 5 Sortier- und Zerkleinerungsprozessen unterzogen.

Durch eine **Vorauslese** werden zunächst große Steine und Beton, Metall und sperriges Material entfernt. Das verbliebene Material durchläuft eine **Siebtrommel** (80 mm Durchmesser); der Siebdurchgang (Fraktion <80 mm) verläßt die Anlage. Staub und Abgase der Siebtrommel werden in einem ersten **Zyklon** getrennt. Die Fraktion 80-200 mm gelangt in den ersten **Magnetabscheider** und danach über eine Längenauslese in den **Shredder**. Die großen Stücke (>200 mm) aus der Siebtrommel werden **per Hand ausgelesen** und bilden die Fraktionen große Steine/Beton, Metalle und sperriges Material. Das verbleibende Material wird zusammen mit der Fraktion aus der Längenauslese im Shredder zerkleinert, nochmals nach Länge ausgelesen und schließlich einem **Windsichter** zugeführt, um die leichte Fraktion vom Rest abzutrennen. Staub und Abgase aus dem Windsichter werden in einem zweiten **Zyklon** getrennt. Die schwere aus dem Windsichter ausgeschiedene Fraktion verläßt nach nochmaliger Metallabscheidung durch einen zweiten Magnetabscheider die Anlage.

Massenbilanz

Am Tag der Beprobung wurde folgende Massenbilanz erstellt:

Tab. 8-9: Massenbilanz der Sortieranlage (SORTAG)

| Sortierprozesse | Massen [Gew %] bezogen auf das gesamte Eingangsmaterial |
|---|---|
| Sortierprozeß + resultierende Fraktionen | |
| Vorauslese Total | 7 |
| Multikomponentenmaterial | 1,7 |
| Metalle | 1,3 |
| Beton und Steine | 4 |
| Siebsystem Total(0-80 mm) | 45 |
| Magnetabscheider (Metalle aus Fraktionen >80 mm) | 1 |
| Handauslese Fraktionen >200 mm | 3 |
| Multikomponentenmaterial | 0,2 |
| mineralische Fraktion >320 mm | 1,8 |
| Metalle | 1 |
| Windsichter | 44 |
| Leichtfraktion | 23 |
| Schwerfraktion | 21 |

Multikomponentenmaterial=Papier, Kunststoffe, sperriges Material etc.; Siebfr.=Siebfraktion

Auf Grund der ähnlichen stofflichen Zusammensetzung einzelner Fraktionen wurden für weitergehende Untersuchungen die Produkte der Sortierung in vier relativ homogene neue Fraktionen und einen mengenmäßig unbedeutenden Rest eingeteilt:

- die vorwiegend mineralische **Fraktion 1 (45 %)**, bestehend aus der **Siebfraktion <80 mm**,
- die brennbare **Fraktion 2 (25 %)**, bestehend aus der **Leichtfraktion**, dem sperrigen Material (**Multikomponentenmaterial**),
- die **mineralische Fraktion 3 (27 %)**, bestehend aus **Beton, Steinen und der Schwerfraktion** und
- die **Metallfraktion (3 %)**.

Der Rest von 0,1 % sind die Stäube und Abgase.

Stoffkonzentrationen

Tab. 8-10: Vergleich der Zusammensetzung der Erdkruste mit Bausperrgut und den Fraktionen 1, 2, 3 und „Metalle“ (SORTAG)

| Stoffe | Bausperrgut | Fraktion 1 (mineralisch) | Fraktion 2 (brennbar) | Fraktion 3 (mineralisch) | Metalle | Erdkruste |
|---------------|-------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|---------|-----------|
| Matrix | | [g/kg TS] | | | | |
| S | 5,8 | 7,3 | 5,7 | 3,9 | n.b. | 0,3 |
| TC | 93 | 62 | 210 | 48 | n.b. | 0,2 |
| TIC | 33 | 41 | 17 | 38 | n.b. | |
| TOC | 60 | 21 | 190 | 9,9 | n.b. | |
| Si | 121 | 159 | n.b. | 182 | n.b. | 280 |
| Cl | 0,84 | 0,16 | 2,9 | 0,17 | n.b. | 0,13 |
| Ca | 150 | 180 | 91 | 160 | n.b. | 41 |
| Al | 9,5 | 10 | 6,9 | 12 | n.b. | 81 |
| Fe | 40 | 12 | 16 | 20 | 800 | 54 |
| Spuren | | [mg/kgTS] | | | | |
| Zn | 790 | 540 | 1400 | 170 | 4.900 | 70 |
| Pb | 630 | 200 | 940 | 930 | 1.800 | 13 |
| Cr | 150 | 160 | 90 | 130 | 760 | 100 |
| Cu | 670 | 47 | 420 | 330 | 11.500 | 50 |
| Cd | 1,0 | 0,7 | 2,3 | 0,5 | n.b. | 0,1 |
| Hg | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,1 | n.b. | 0,02 |

n.b..... nicht bestimmt

Die Zusammensetzung der Fraktion 1 ist auf den ersten Blick relativ ähnlich der durchschnittlichen Zusammensetzung der Erdkruste, weist aber einige wichtige Unterschiede auf: die Erdkruste enthält fünf- bis zehnmal soviel Eisen, Aluminium, Kalium und Natrium, dafür 100 mal weniger Kohlenstoff, 20 mal weniger Schwefel und viermal weniger Kalzium als Fraktion 1. In der Fraktion 1 finden sich wesentlich mehr Schwermetalle als in der durchschnittlichen Erdkruste, z. B. 15 mal mehr Blei, 10 mal mehr Quecksilber, 8 mal mehr Zink und Cadmium.

Fraktion 2 ist stark mit organischem Kohlenstoff, Chlor und einzelnen Schwermetallen angereichert und unterscheidet sich vollkommen von einem erdkrustenähnlichen Material. Der Hauptunterschied besteht im 1000 mal höheren Kohlenstoffgehalt, in der hohen Konzentration an Stickstoff, Chlor und Schwefel und an den eine bis zwei Größenordnungen höheren Gehalten an Spurenelementen. Diese Fraktion ist für eine thermische Behandlung geeignet.

Fraktion 3 ist ähnlich zusammengesetzt wie Fraktion 1. Bei den Matrixelementen besteht der Hauptunterschied im Gehalt an Kohlenstoff und Schwefel, welche beide in Fraktion 3 nur

halb so groß sind wie in Fraktion 1, und dem Gehalt an Eisen, welcher in der Schwerfraktion deutlich höher ist. Von den Spurenelementen sind Blei und Kupfer in höheren, Zinn und Zink in tieferen und die meisten anderen Elemente in ähnlicher Konzentration enthalten wie in Fraktion 1. Fraktion 3 ist ebenso wie Fraktion 1 ähnlich zusammengesetzt wie die Erdkruste. Sie beinhaltet allerdings mehr Kalzium aber weniger Alkalimetalle, Aluminium und Eisen. Kohlenstoff Stickstoff und Schwefel sind in Fraktion 3 um mehr als eine Größenordnung konzentrierter als in der Erdkruste. Bei den Spurenelementen sind es vor allem die Gehalte an Blei, Kupfer und Arsen, welche in dieser Fraktion etwa zehnmal höher sind als in der Erdkruste. Auch Zink, Cadmium und Quecksilber sind deutlich konzentrierter.

Die quantitativ weniger bedeutende Metallfraktion kann als Eisenschrott wiederverwertet werden.

Verteilung der Elemente

Tab. 8-11: Prozentuelle Verteilung der Elemente bei der Bausperrgutsortierung

| Stoffe | Fraktion 1 (mineralisch) | Fraktion 2 (brennbar) | Fraktion 3 (mineralisch) | Metalle | Rest |
|---------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|---------|------|
| Matrix | | | [%] | | |
| S | 57 | 24 | 18 | n.b. | 1 |
| TOC | 16 | 80 | 4 | n.b. | 0 |
| Si | 60 | n.b. | 40 | n.b. | n.b. |
| Cl | 9 | 86 | 5 | n.b. | 0 |
| Ca | 56 | 15 | 29 | n.b. | n.b. |
| Al | 42 | 21 | 34 | 3 | 0 |
| Fe | 14 | 10 | 13 | 63 | 0 |
| Spuren | | | [%] | | |
| Zn | 31 | 44 | 5 | 20 | 0 |
| Pb | 14 | 37 | 40 | 9 | 0 |
| Cu | 3 | 15 | 13 | 69 | 0 |
| Cd | 29 | 57 | 14 | n.b. | n.b. |
| Hg | 43 | 36 | 12 | n.b. | 9 |

n.b.... nicht bestimmt

Durch die Sortierung gelang es nur in seltenen Fällen, ein einzelnes Element mit einer relativ großen Trennschärfe in eine bestimmte Fraktion zu lenken. Solche Ausnahmen sind organischer Kohlenstoff und Chlor, welche beide zu über 80 % in die brennbare Fraktion 2 abgetrennt werden. Kupfer wird zu 69 % in die Metallfraktion transferiert.

Anreicherung in den Fraktionen

Die Resultate zeigen, daß auf der untersuchten Anlage durch die Sortierung wohl Elemente in den einzelnen Fraktionen angereichert und abgemindert werden, daß aber die Anreicherung von nützlichen Stoffen (Kalzium, Silikate, Karbonate), respektive die Abminderung von unerwünschten Stoffen (Schwermetallen, org. Kohlenstoff, Chlor) in den Fraktionen 1 und 3 relativ bescheiden bleibt; Erdkrustenqualität wird nicht erreicht. Erfolgreicher ist die Anreicherung von brennbaren Anteilen in der Fraktion 2, sowie die sehr effiziente Anreicherung in der Metallfraktion. Der Hauptvorteil der Sortierung des Bausperrgutes besteht darin, daß die Anlage durch die Abtrennung einer brennbaren, verunreinigten Fraktion die Deponietauglichkeit des restlichen Materials entscheidend verbessert.

8.4 Grundlagenuntersuchung zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Bauschutt und Baustellenabfällen

In einer Studie über die „Grundlagenuntersuchung zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Bauschutt und Baustellenabfällen“ (WALKER & DOHMANN 1994) wurden vergleichende Untersuchungen an aufbereitetem Bauschutt und Baustellenabfällen sowie an natürlichen Materialien (Sand, Kies) unterschiedlicher Korngröße durchgeführt. Es wurden insgesamt zwei Anlagen zur Aufbereitung von Baustellenabfällen, acht Anlagen zur Aufbereitung von Bauschutt und drei Anlagen zur Aufbereitung natürlicher Materialien untersucht. Die Auswahl der Kiesbrüche erfolgte nach geographischen Gesichtspunkten: sie sollten sich im Einzugsgebiet der zu beprobenden Aufbereitungsanlagen befinden, um geologische Charakteristika des jeweiligen Standortes zu erfassen.

Die untersuchten Anlagen werden durchwegs trocken gefahren und sind mit unterschiedlichen Zerkleinerungs- und Sortiervorrichtungen ausgestattet. Aus dem in den Tagen vor der Probenahme aufgehaldeten aufbereiteten Material („**Bauschutt bzw. natürliche Mineralstoffe Endprodukt**“) wurden pro Anlage 5 Einzelproben zu rund 20 kg gezogen, zu einer Sammelprobe vermischt und homogenisiert. Eine repräsentative Teilprobe daraus wurde durch Teilen gewonnen, luftgetrocknet und auf eine Korngröße <100 µm gemahlen.

Die sogenannte **Bauschutt Teilfraktion** wurde von den Autoren im Labor durch Absiebung einer Parallelprobe aus den sogenannten Endprodukten bei 10 mm Maschengröße des Siebs gewonnen. Anhand dieser Fraktionen sollte ein potentieller Einfluß der Korngröße des Materials auf das Ergebnis der Aufbereitung untersucht werden.

In der Folge werden nur diejenigen Ergebnisse der Studie vorgestellt, welche für einen Vergleich mit den eigenen Resultaten geeignet sind.

Tab. 8-12: Mittelwerte und Wertebereiche der Stoffkonzentrationen in den Feststoffen

| Stoffe | Bauschutt Teilfraktion (0-10 mm) n=10 | Bauschutt Endprodukt (0-45 mm) n=10 | natürliche Mineralstoffe Endprodukt n=4 |
|--------------------------------|---|---|---|
| [g/kg Trockensubstanz] | | | |
| TOC | 23 (10 bis 46) | 20 (8 bis 30) | 2 (u.N. bis 4) |
| [mg/kg Trockensubstanz] | | | |
| Zn | 180 (80 bis 360) | 110 (63 bis 190) | 100 (58 bis 180) |
| Pb | 66 (17 bis 160) | 40 (8 bis 130) | 17 (7 bis 42) |
| Cr | 15 (8 bis 40) | 12 (5 bis 40) | 8 (3 bis 8) |
| Cu | 52 (15 bis 260) | 24 (15 bis 260) | 12 (4 bis 16) |
| Cd | 0,39 (0,16 bis 0,84) | 0,18 (u.N. bis 0,41) | 0,05 (u.N. bis 0,19) |
| Hg | 0,16 (0,06 bis 0,32) | 0,06 (0,02 bis 0,12) | 0,08 (0,04 bis 0,15) |

n.....Probenanzahl

u.N.....unter der Nachweisgrenze des angewendeten Analyseverfahrens

Der TOC-Gehalt liegt bei den Recyclingmaterialien durchschnittlich zwischen 2 % (Bauschutt Endprodukt) und 2,3 % (Bauschutt Teilfraktion), bei den natürlichen Mineralstoffen bei 0,2 %, also um eine Größenordnung niedriger. Bei allen untersuchten Spurenelementen unterschreiten die Analysenwerte der natürlichen Mineralstoffe diejenigen der Recyclingmaterialien.

Der Tabelle 8-12 ist weiterhin zu entnehmen, daß das Untersuchungsergebnis bei den untersuchten Metallen korngößenabhängig ist. In der „Bauschutt Teilfraktion“ mit Korngrößen von 0-10 mm läßt sich eine deutliche Anreicherung nahezu aller untersuchten Elemente gegenüber dem Endprodukt mit Korngrößen von 0-45 mm erkennen.

8.5 Vergleich der vorgestellten Arbeiten über trockene Verfahren mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie

• Massenverteilung

Die folgende Tabelle zeigt den Vergleich der Massenverteilung in den trockenen Anlagen BASORAG, SORTAG und der hier untersuchten nassen Aufbereitungsanlage, die mit STOVAUF bezeichnet wird. Die für STOVAUF eingesetzten Werte wurden auf Basis der Massenbilanz der **festen Outputgüter** von Tab. 9-1 erhalten, wobei die Mittelwerte der drei Versuche mit vorsortiertem Bauschutt auf die Gesamtmenge des Eingangsmaterials bezogen wurden.

In der Massenverteilung auf die einzelnen Outputfraktionen spiegelt sich die unterschiedliche Zusammensetzung des Eingangsmaterials der drei dargestellten Anlagen wider. **Der nicht mineralische** Anteil ist bei der Anlage BASORAG mit rund 40 % am höchsten, bei SORTAG beträgt er rund 25 % und bei STOVAUF rund 20 %; der Metallanteil davon beträgt 2,2 %, bzw. 3,3 % und 0,2 %. Der Rest des nicht mineralischen Anteils besteht bei BASORAG hauptsächlich aus sogenanntem Multikomponentenmaterial (38 %), das sind vor allem Papier und Kunststoffe, bei SORTAG aus der ebenso brennbaren Leichtfraktion (23 %) des Windsichters und bei STOVAUF aus der Leichtfraktion der Setzmaschine und dem vorausgelesenen Material.

Tab. 8-13: Vergleich der Aufbereitungsprozesse von BASORAG, SORTAG und STOVAUF

| Aufbereitungsprozesse | Massen in [Gew %] bezogen auf das gesamte Eingangsmaterial | | |
|---|--|-----------|------------|
| | BASORAG | SORTAG | STOVAUF |
| Aufbereitungsprozeß + resultierende Fraktionen | | | |
| Vorauslese Total | 32 | 7 | 18 |
| Multikomponentenmaterial | 27 | 1,7 | - |
| Metalle | 2 | 1,3 | - |
| Beton und Steine | 2,5 | 4 | - |
| Holz | 0,5 | - | - |
| Sieb- und Brechsystem (0-80 mm)bzw. (0-32 mm)Total | 43 | 45 | 73 |
| Siebfraktion 0-30 mm (mineralisch) | 30 | - | - |
| Siebfraktion 30-80 mm (mineralisch) | 13 | - | - |
| Korngröße 0-4 mm (mineralisch) | - | - | 27 |
| Korngröße 4-16 mm (mineralisch) | - | - | 28 |
| Korngröße 16-32 mm (mineralisch) | - | - | 18 |
| Magnetabscheider | - | 1 | 0,2 |
| Handauslese Fraktionen >80 mm | 25 | 3 | - |
| Siebfraktion 80-320 mm (mineralisch) | 11 | - | - |
| Multikomponentenmaterial | 11 | 0,2 | - |
| mineralische Fraktion >320 mm | 2 | 1,8 | - |
| Metalle | 0,2 | 1 | - |
| Holz | 0,8 | - | - |
| Windsichter bzw. Setzmaschine | - | 44 | 9 |
| Leichtfraktion | - | 23 | 3 |
| Schwerfraktion (mineralisch) | - | 21 | - |
| Abwassersediment (mineralisch) | - | - | 6 |

Multikomponentenmaterial=Papier, Kunststoffe etc

• **Stoffliche Zusammensetzung der Outputfraktionen**

Tab. 8-14: Wertebereiche der mittleren Stoffkonzentrationen in den mineralischen Fraktionen aller verglichenen Anlagen

| STOVAUF 1997 (NASSE AUFBEREITUNG) | | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|-------------|--------------|--------------------------|--------------|-------------|--------------|--------------------------|
| Stoffe | BAUSCHUTT | | | | BETONABBRUCH | | | |
| | 0/4 (n=15) | 4/16 (n=15) | 16/32 (n=15) | Abwasser-sediment (n=15) | 0/4 (n=15) | 4/16 (n=15) | 16/32 (n=15) | Abwasser-sediment (n=15) |
| Matrix | [g/kg Trockensubstanz] | | | | | | | |
| S | 1,4-2 | 1,3-2 | 1,6-2,4 | 2,3-2,5 | 1,3-1,4 | 1-1,4 | 1,4-1,8 | 2,6-2,8 |
| TC | 59-83 | 59-75 | 54-68 | 77-98 | 84-98 | 83-100 | 78-96 | 81-83 |
| TIC | 47-76 | 52-66 | 53-62 | 47-64 | 82-86 | 81-97 | 75-77 | 68-69 |
| TOC | 6,8-14 | 7-9,8 | 1,8-7,8 | 19-51 | 2,5-12 | 2,7-3,4 | 3-19 | 14-15 |
| Si | 120-190 | 130-170 | 160-170 | 170 | 73-120 | 60-110 | 70-120 | 112 |
| Cl | <1,5 | <1,5 | <1,5 | <1,5 | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. |
| Ca | 140-210 | 160-210 | 160-210 | 160-200 | 220-230 | 230-240 | 230-240 | 210 |
| Al | 6,6-11 | 8,6-15 | 9-15 | 14-20 | 3,9-4,4 | 3-4,4 | 4-4,8 | 13-14 |
| Fe | 6,9-16 | 7,8-16 | 8-15 | 12-20 | 4-5,9 | 4-5,3 | 4-6,4 | 11-13 |
| Spuren | [mg/kg Trockensubstanz] | | | | | | | |
| Zn | 34-44 | 29-42 | 30-61 | 110-200 | 23-28 | 20-44 | 15-27 | 70-230 |
| Pb | 21-56 | 16-64 | 30-110 | 67-85 | 8,8-38 | 13-42 | <8-8,5 | 23-130 |
| Cr | 13-25 | 15-25 | 17-24 | 33-41 | 9-15 | 8-11 | 9-12 | 32-33 |
| Cu | 11-22 | 8-21 | 10-16 | 22-45 | <5-12 | <5-17 | <5-7,3 | 28-31 |
| Cd | 0,13-0,2 | 0,11-0,2 | 0,12-0,2 | 0,31-0,62 | 0,11-0,2 | 0,1-0,2 | 0,15-0,18 | 0,31-0,48 |
| Hg | 0,06-0,47 | 0,04-0,17 | 0,04-0,11 | 0,26-3,1 | 0,04 | 0,04 | 0,02-0,04 | 0,14-0,18 |

| Stoffe | SORTAG 1993 | | BASORAG 1991 | | SINDT ET AL 1997 | | | | WALKER&DOHMANN 1994 | | Erdkruste/ (Bach-sedimente)* |
|---------------|--------------------------------|----------------|--------------|-------|------------------|------|------|-----|---------------------|-------------|---------------------------------|
| | <80 | Schwerf-rakton | 0/30 | 30/80 | 0/4 | 4/25 | 0/45 | >45 | 0/10 (n=10) | 0/45 (n=10) | |
| Matrix | [g/kg Trockensubstanz] | | | | | | | | | | |
| S | 7,3 | 3,9 | 13 | 9,6 | - | - | - | - | - | - | 0,3 |
| TC | 62 | 48 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,2 |
| TIC | 41 | 38 | 35 | 34 | - | - | - | - | - | - | |
| TOC | 21 | 9,9 | 28 | 21 | - | - | - | - | 10-46 | 8-30 | |
| Si | 159 | 182 | 208 | 227 | - | - | - | - | - | - | 280 |
| Cl | 0,16 | 0,17 | <1 | <1 | - | - | - | - | - | - | 0,13 |
| Ca | 180 | 160 | 143 | 145 | - | - | - | - | - | - | 41 |
| Al | 10 | 12 | 32 | 34 | - | - | - | - | - | - | 81 (92) |
| Fe | 12 | 20 | 31 | 22 | - | - | - | - | - | - | 54(4) |
| Spuren | [mg/kg Trockensubstanz] | | | | | | | | | | |
| Zn | 540 | 170 | 1.725 | 155 | 133 | 65 | 84 | 26 | 80-360 | 63-190 | 70 (77) |
| Pb | 200 | 930 | 549 | 111 | 35 | 22 | 16 | 16 | 17-160 | 8-130 | 13 (25) |
| Cr | 160 | 130 | - | - | - | - | - | - | 8-40 | 5-40 | 100 (73) |
| Cu | 47 | 330 | 783 | 319 | - | - | - | - | 15-260 | 15-260 | 50 (21) |
| Cd | 0,7 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | - | - | - | - | 0,16-0,84 | u.N.-0,41 | 0,1 |
| Hg | 0,2 | 0,1 | - | - | - | - | - | - | 0,06-0,32 | 0,02-0,12 | 0,02 |

n.....Probenanzahl

n.b.. nicht bestimmt

*Mittelwerte der Gehalte österreichischer Bachsedimente der Zentralzone (LECHNER et al. 1991)

Die Konzentrationen der Matrixelemente liegen für alle dargestellten Anlagen in der gleichen Größenordnung. Eine Korrelation zwischen Korngröße und Stoffkonzentrationen ist nicht zu erkennen. Die Schwefelkonzentration der Produkte aus den trockenen Anlagen liegt allerdings durchwegs höher als bei den Outputs der nassen Aufbereitung. Eine Erklärung hierfür ist, daß der ohnehin nieder konzentrierte Schwefel des Eingangsmaterials bei nasser Aufbereitung zu rund 15 % über das Abwasser abgeführt wird und dadurch die festen Produkte entfrachtet werden. Auch der organische Kohlenstoff ist in den meisten Produkten der trockenen Aufbereitung höher konzentriert, was vor allem bei dem Projekt BASORAG auf *eine hohe Kontamination des Eingangsmaterials* (Muldegut; Zusammensetzung siehe Tab. 8-8) mit *organischer Substanz*, welche durch den Aufbereitungsprozeß nur ungenügend von den mineralischen Fraktionen getrennt wird, zurückzuführen ist.

Die Gehalte an Spurenelementen sind bei den betrachteten Anlagen zwar unterschiedlich, sie liegen allerdings nie um mehr als eine Größenordnung auseinander. Grundsätzlich ist zu erkennen, daß *auf Grund des sauberen Eingangsmaterials* die Konzentrationen bei der nassen Aufbereitung kleiner sind bzw. im unteren Konzentrationsbereich der übrigen Anlagen liegen. Die größten Unterschiede zeigen sich bei den Elementen Zink, Blei, Chrom und Kupfer, welche bei SORTAG (*Muldegut!*) in beiden untersuchten Fraktionen und BASORAG in den Fraktionen 0 bis 80 in rund 10mal höherer Konzentration vorliegen als bei den anderen Anlagen. Die hohen Konzentrationen in der Schwerfraktion von SORTAG sind auf das kontaminierte Eingangsmaterial und auf die Entstehung dieser Fraktionen bei der Aufbereitung zurückzuführen: Die metallischen Bestandteile, welche zu groß für die Absiebung <80 mm und zu klein für die Handsortierung sind, verbleiben bei der Windsichtung auf Grund ihres spezifischen Gewichtes in der Schwerfraktion. Die hohen Spurenelementkonzentrationen der Anlage BASORAG sind wiederum *auf die Kontamination des Eingangsmaterials und auf das Fehlen eines Magnetabscheiders* in der Anlage zurückzuführen, der zusammen mit dem Eisen auch einen Zinkanteil erfassen würde.

Die Konzentrationen der Spurenelemente bei BASORAG, SINDT et al und WALKER & DOHMANN sind mit wenigen Ausnahmen (Chrom und Kupfer bei WALKER & DOHMANN) korngößenabhängig; je kleiner die Korngröße, desto höher die Konzentration. Bei den eigenen Untersuchungen sind die höchsten Konzentrationen der untersuchten Elemente im *Abwassersediment*, der Fraktion mit den kleinsten Korngrößen, zu finden; die Konzentrationsunterschiede zwischen den übrigen Korngrößen (0/4, 4/16 und 16/32) sind bei der nassen Aufbereitung im Unterschied zu den trockenen Verfahren marginal. Dies läßt sich dadurch erklären, daß bei der nassen Aufbereitung der mit Schadstoffen belastete Feinstanteil des bereits zerkleinerten Materials, der bei trockener Aufbereitung vorwiegend auf die kleineren Korngrößenfraktionen verteilt wird, abgewaschen wird und als Abwassersediment anfällt.

• **Anreicherung**

Sowohl bei den trockenen Verfahren, als auch bei der nassen Aufbereitung reichert sich der *organische Kohlenstoff* in der *Leichtfraktion* an (BASORAG: Multikomponentenmaterial Faktor 2 bis 3; SORTAG: Leichtfraktion und Multikomponentenmaterial Faktor 3; STOVAUF: Leichtgut Faktor 6 bis 32). Bei Vorhandensein eines Magnetabscheiders wird eine sehr effiziente Anreicherung von *Eisen in der Metallfraktion* erreicht (SORTAG: Faktor 20, STOVAUF Faktor 90). Im übrigen zeigte sich, daß bei der trockenen Aufbereitung von nicht nach der Trennverordnung sortierten Baurestmassen (BASORAG und SORTAG) eine An- bzw. Abreicherung der weiteren Matrix- bzw. Spurenelemente relativ bescheiden bleibt. SINDT et al. zeigen für die *trockene Aufbereitung* von Bauschutt, der ausschließlich aus dem Hochbau stammt, daß sich die *Spurenelemente in der Feinfraktion* (0 bis 4 bzw. 0 bis 8 mm) anreichern. Bei der *nassen Aufbereitung* findet diese Anreicherung im *Abwassersediment*, der feinsten Outputfraktion dieses Verfahrens, statt (höchster beobachteter Anreicherungsfaktor: 9 für Quecksilber bei der Aufbereitung von Bauschutt im zweiten Hauptversuch).

9 BEANTWORTUNG DER FRAGEN

In diesem Abschnitt wird versucht, die in Kapitel 3 gestellten Fragen zu beantworten und damit gleichzeitig die Ergebnisse dieser Arbeit zusammenzufassen.

- **Welche Produkte entstehen bei der nassen Aufbereitung im Jahresschnitt und bei der Beprobung?**

Die Produkte, die bei der Beprobung der Anlage gemessen wurden, sind die selben, die auch im Jahresschnitt anfallen. Es sind dies:

1. **Eisenschrott:** händisch oder über den Magnetabscheider entferntes Eisen
2. **Holz und Kunststoff:** händisch aussortiertes Material
3. **Leichtgut:** Outputgut der Setzmaschine, bestehend aus kleinen Stücken von Holz, Kunststoff, Isolier- und Installationsmaterial, Gips etc.
4. **Fraktion 1:** Material mit Korngrößen von 16-32 mm
5. **Fraktion 2:** Material mit Korngrößen von 4-16 mm
6. **Fraktion 3:** Material mit Korngrößen von 0-4 mm

Das Abwasser transportiert einen bestimmten Feststoffteil, der ein weiteres Outputgut darstellt und separat bilanziert wird. Er wird in der Folge als Abwassersediment bezeichnet.

7. **Abwasser:** die flüssige Phase ohne Feststoffe
8. **Abwassersediment:** die mit dem Abwasser transportierten Feststoffe

- **Wie sieht die Massenbilanz der untersuchten Anlage während eines Jahres und während des Beprobungszeitraumes aus?**

Die Menge der jährlich auf die Anlage gebrachten Baurestmassen beläuft sich auf rund 75.000 Tonnen. Davon sind rund 20 % (15.000 t) nicht verwertbar; sie bestehen hauptsächlich aus großen Stücken von Holz und Metall und werden vor der Aufbereitung aussortiert. Dieser **nicht verwertbare Anteil** konnte in der **vorliegenden Arbeit nicht bilanziert werden**, da die Baurestmassen schon vorsortiert in Boxen gelagert werden und von dort in die Anlage gelangen. Der der aufbereiteten Menge zuzuordnende Massenanteil an nicht verwertbarem Material war im Nachhinein nicht zu eruieren.

Die 100 % Input der Jahresbilanz in Tabelle 9-1 entsprechen der jährlich angelieferten Masse von Baurestmassen abzüglich der 20 % nicht verwertbarem Anteil. Die Abweichungen der summierten Massenanteile von Hundert ist auf den im Vergleich zum Edukt höheren Wassergehalt der Outputgüter nach Durchlaufen der nassen Aufbereitung zurückzuführen.

Unterschiede zwischen den Angaben der Betreiber (Tab. 9-1 Zeile „Jahresbilanz“) und den Versuchsergebnissen sind zunächst für den Holz- und Kunststoffanteil, sowie für den Massenanteil von Eisenschrott am Input zu erkennen. Gründe hierfür könnten entweder ungenaue Angaben von seiten der Betreiber oder eine vom Jahresschnitt abweichende Zusammensetzung des Inputs sein. Weiterhin gelangt bei allen Versuchen im Vergleich zur Jahresbilanz ein größerer Massenanteil der Edukte in die Fraktion 2 (vom Jahresschnitt abweichende Zusammensetzung des Inputs?), bei Betonabbruch über 40 %. Beim Abwassersediment lassen sich die Unterschiede zwischen Jahresbilanz und Versuchen durch die nicht vollständig erfassbare Abwassermenge (siehe unten) erklären.

Tab. 9-1: Massenbilanz der festen Outputgüter der Anlage während eines Jahres und während des Beprobungszeitraumes (HV1, HV2 = Hauptversuch 1 und 2)

| | Vorsortierte Baurestmassen | | Holz und Kunststoffe [%] | Eisenschrott [%] | Fraktion 1 (16/32) [%] | Fraktion 2 (4/16) [%] | Fraktion 3 (0/4) [%] | Leichtgut [%] | Abwassersediment [%] |
|--------------|----------------------------|--------|------------------------------|----------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------|--------------------------|
| | [%] | [t/h] | | | | | | | |
| Jahresbilanz | 100-115 | 150 | 0,5 | 1 | 26 | 26 | 36 | 1 | 10-15 |
| Vorversuch | 100-111 | 80 | 0,06 | 0,2 | 21 | 35 | 35 | 1,7 | 7-11 |
| HV1 | | | | | | | | | |
| Bauschutt | 102-110 | 58 | 0,1 | 0,2 | 24 | 35 | 34 | 2,1 | 7-8 |
| Betonabbruch | 110 | 32 | 0,03 | 0,3 | 24 | 44 | 34 | 0,6 | 7 |
| HV2 | | | | | | | | | |
| Bauschutt | 100 | 75 | 0,1 | 0,2 | 20 | 36 | 33 | 5 | 5-6 |
| Betonabbruch | 108 | 45 | 0,002 | 0,2 | 21 | 44 | 36 | 1,1 | 5-6 |

Der durchschnittliche **Wasserverbrauch** der Anlage beträgt nach Angaben der Betreiber rund 1-2 m³ pro Tonne aufbereitetem Material; über die **Abwassermenge** konnten keine Angaben gemacht werden. Der im zweiten Hauptversuch **gemessene Wasserverbrauch** ergab rund 300 t/h, was 4 m³ pro Tonne Bauschutt entspricht. Die in diesem Versuch anfallende **Abwassermenge wurde ebenfalls gemessen** und betrug 130-190 t/h. Die Differenz zum Wasserinput läßt sich durch die über die Produkte der Anlage abgeführte Wassermasse erklären, die sich allerdings nicht im Wassergehalt der einzelnen Fraktionen widerspiegelt, sondern bereits beim Austrag aus der Setzmaschine bzw. dem Schöpfrad auf dem Anlageareal verrinnt und schließlich versickert; dieser Abwasserfluß kann an der Meßstelle nicht erfaßt werden.

- **Wie verteilen sich ausgewählte Stoffe bei der nassen Aufbereitung während des Beprobungszeitraumes?**

Verteilung der Matrixelemente

Die Matrixelemente des vorsortierten Bauschutts bzw. Betonabbruchs verteilen sich in der untersuchten Anlage bei der Aufbereitung zu annähernd gleichen Teilen auf **die Fraktionen 1(16-32 mm), 2(4-16 mm) und 3(0-4 mm)** (siehe Abb. 9-1 bis Abb. 9-4); wobei Fraktion 2 bei Betonabbruch, mit Ausnahme von Eisen, stets den höchsten Prozentsatz enthält. In das **Abwasser** gelangen, mit Ausnahme des Schwefels (rund 14 % bei sortiertem Bauschutt; rund 10 % bei Betonabbruch), weniger als 1 %, in das **Abwassersediment** rund 10 % der untersuchten Matrixelemente. Im **Leichtgut** finden sich mit Ausnahme des Kohlenstoffes (vorsortierter Bauschutt TOC bis 46 %, Betonabbruch TOC bis 5,4 %) bei vorsortiertem Bauschutt 1 bis 9 % der Matrixelemente bei Betonabbruch 0,1 bis 2 %. Bei vorsortiertem Bauschutt gelangen je nach Versuch 11 bis 25 % Eisen in den **Eisenschrott**, bei Betonabbruch 27 bzw.41 %.

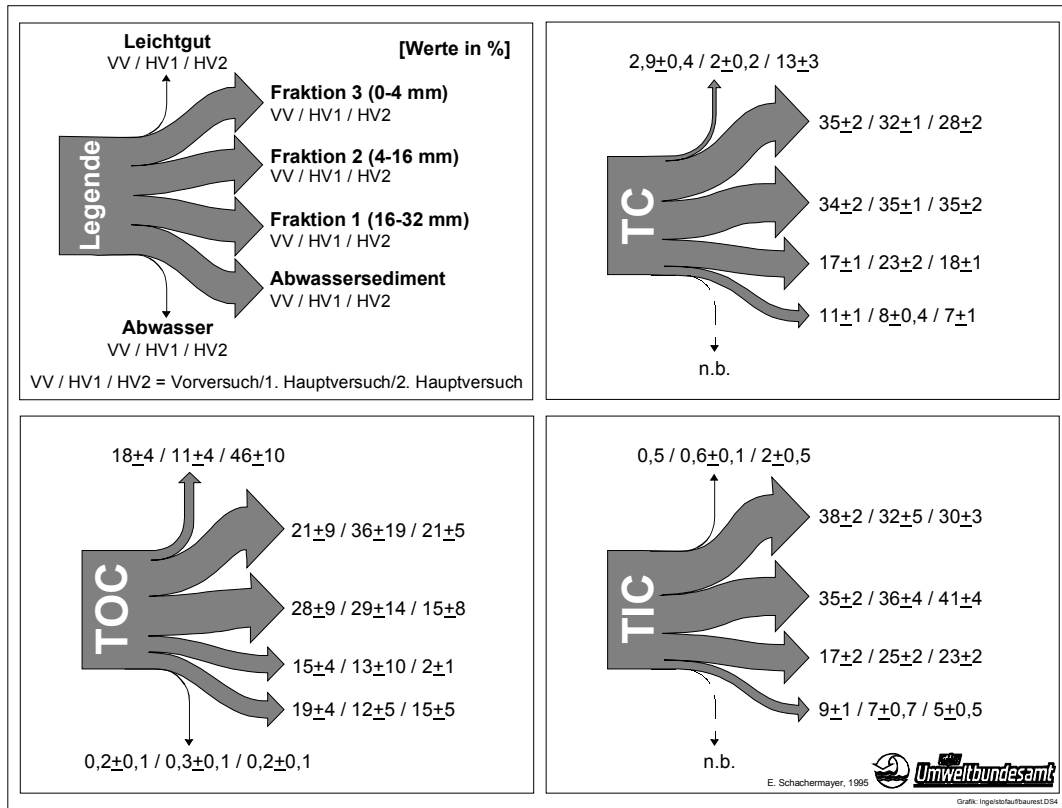


Abb. 9-1: vorsortierter Bauschutt: Prozentuelle Verteilung (inklusive Unsicherheit) des Kohlenstoffes bei der Aufbereitung

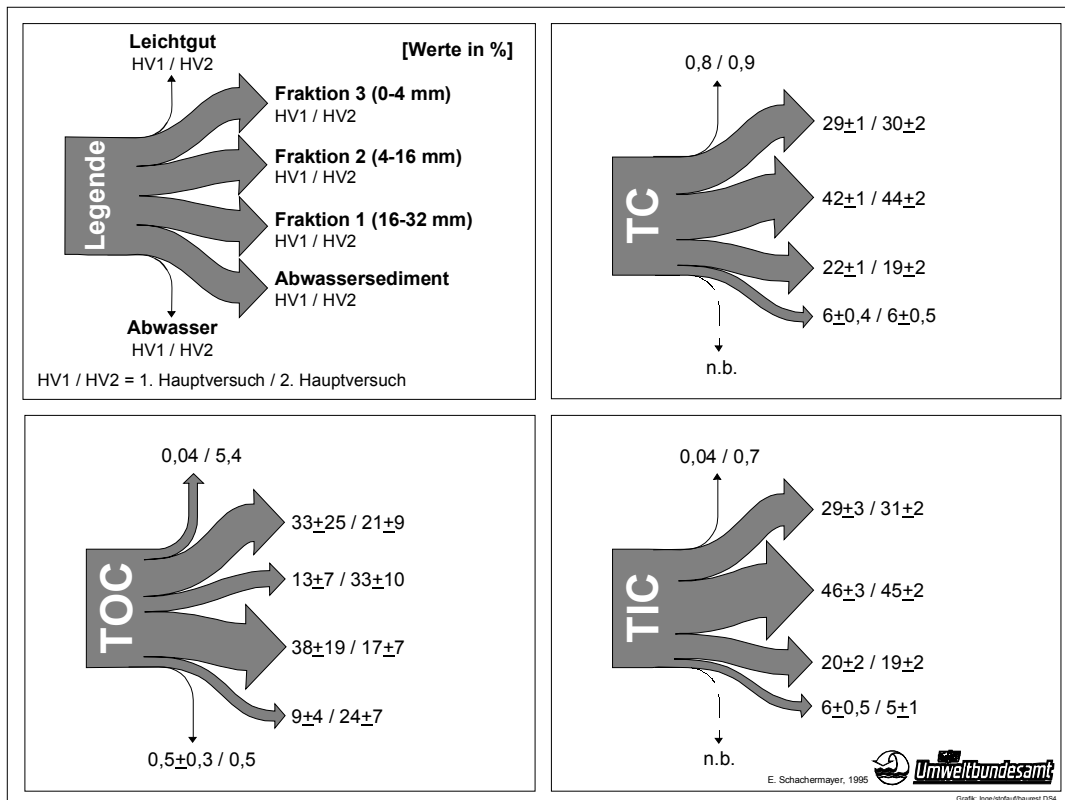


Abb. 9-2: Betonabbruch: Prozentuelle Verteilung (inklusive Unsicherheit) des Kohlenstoffes bei der Aufbereitung

Es ist zu erkennen, daß sich für die Matrixelemente, mit Ausnahme des Kohlenstoffes beim Edukt vorsortierter Bauschutt und des Kalziums bei beiden Edukten, die angegebenen approximativen 95 %-Konfidenzintervalle für die Fraktionen 1, 2, und 3 bei allen durchgeführten Versuchen überlappen. Für das Element **Schwefel** liegt die maximale Intervallbreite bei $\pm 6\%$ ($\pm 8\%$ bei **Betonabbruch**) des geschätzten mittleren Wertes, für **Silzium** bei $\pm 3\%$ ($\pm 6\%$ bei **Betonabbruch**), für **Aluminium** für beide Edukte bei $\pm 5\%$ und für **Eisen** für beide Edukte bei $\pm 7\%$. Für **Kalzium** und den **gesamten Kohlenstoff** überlappen sich die Intervalle zwar nicht, dafür ist die Intervallbreite mit maximalen $\pm 2\%$ ($\pm 6\%$ für **Betonabbruch**) sehr eng. Die geschätzten **mittleren Werte** der Verteilung bei den durchgeführten Versuchen unterscheiden sich bei diesen beiden Elementen um maximal 7 % (siehe: Abb. 9-1 Element TC (gesamter Kohlenstoff) Fraktion 3 :Max. 35 %, Min. 28 %) bzw. 3 % bei Betonabbruch (siehe Abb. 9-2). **Aus diesen Ergebnissen läßt sich ableiten, daß die Verteilung der oben genannten Elemente in der Anlage relativ konstant ist.**

Dies gilt allerdings nicht für den **organischen Kohlenstoff (TOC)**. Seine Verteilung auf die drei Hauptfraktionen der Aufbereitungsanlage ist mit großer Unsicherheit behaftet. Eine Erklärung hierfür ist, daß die Träger von organischem Kohlenstoff (beispielsweise Holzstückchen, restliche Kunststoff- und Verputzpartikel etc.) in den Fraktionen 1, 2 und 3 nicht homogen verteilt, und deshalb in den untersuchten Proben unterschiedlich konzentriert sind. Dieses Ergebnis ist auf Grund der Abschätzung der optimalen Probenanzahl mit 111 Proben für die Bestimmung von organischem Kohlenstoff (siehe Kapitel 5.4 Folgerungen aus dem Vorversuch) nicht überraschend.

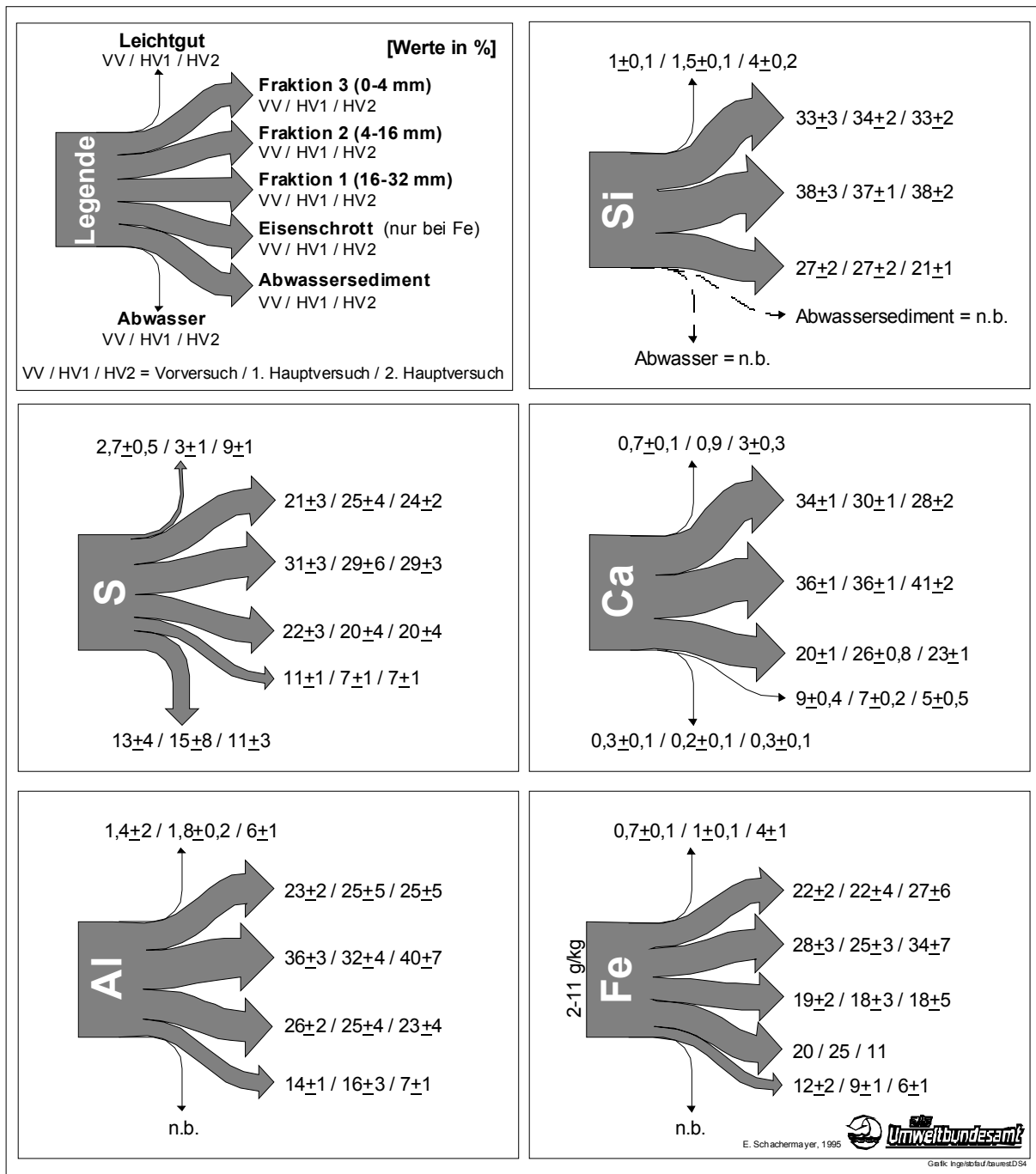


Abb. 9-3: vorsortierter Bauschutt: Prozentuelle Verteilung (inklusive Unsicherheit) der übrigen Matrixelemente bei der Aufbereitung

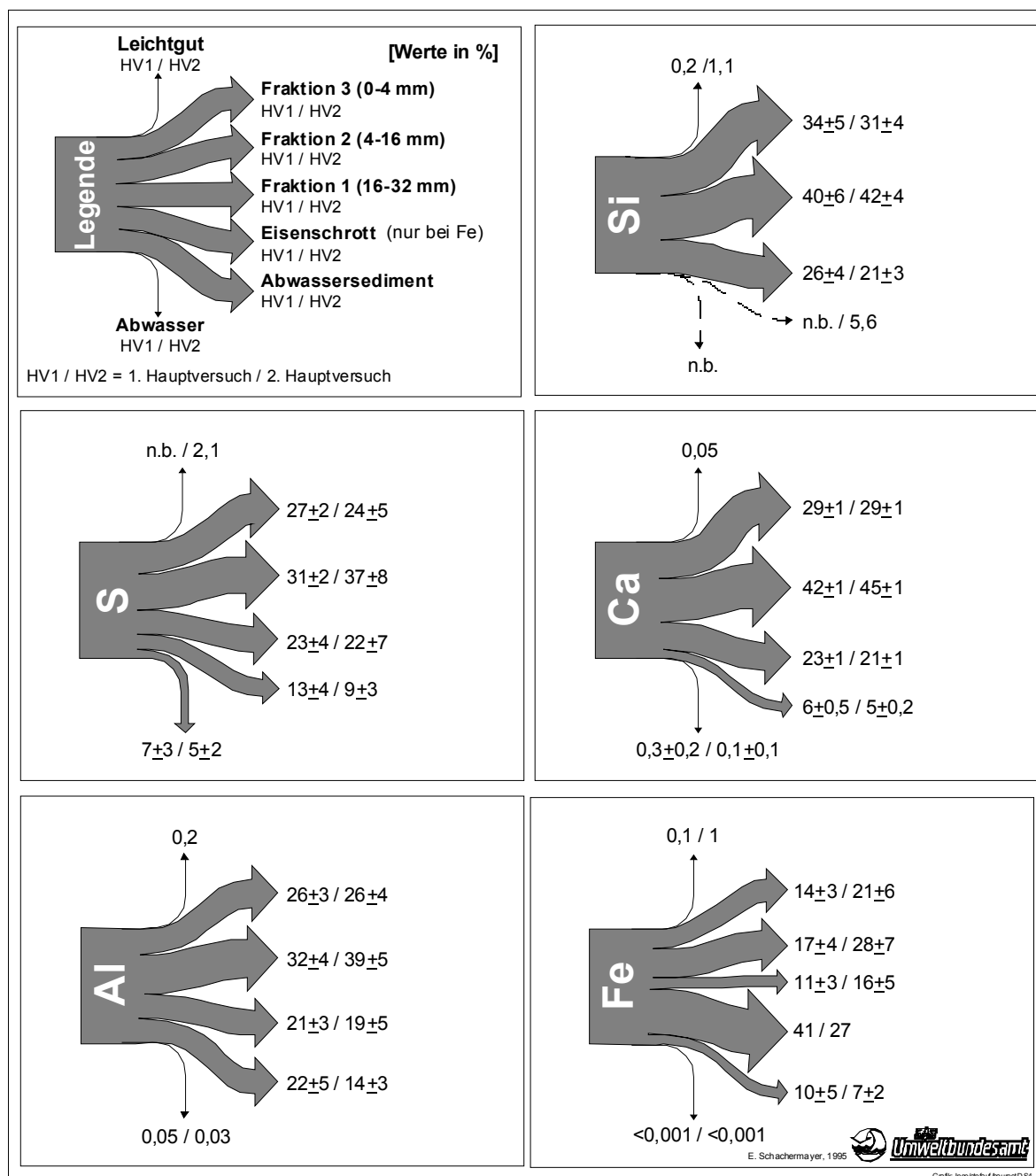


Abb. 9-4: Betonabbruch: Prozentuelle Verteilung (inklusive Unsicherheit) der übrigen Matrixelemente bei der Aufbereitung

Verteilung der Spurenelemente für das Edukt vorsortierter Bauschutt

Bei den Spurenelementen überlappen sich in den Fraktionen 1, 2 und 3 die approximativen 95 %-Konfidenzintervalle aller drei Versuche bei den Elementen **Zink** (maximale Intervallbreite ± 6 %), bei **Chrom** (maximale Intervallbreite ± 8 %), bei **Kupfer** (maximale Intervallbreite ± 8 %) und bei **Cadmium** (maximale Intervallbreite ± 4 %). **Dies bedeutet wiederum, daß die Verteilung der oben genannten Elemente in der Anlage relativ konstant ist.** Die größte Unsicherheit bezüglich ihrer Verteilung weisen die Elemente **Blei** mit einer maximalen Intervallbreite von ± 25 % und **Quecksilber** auf, wobei bei letzterem im Vorversuch die Konzentrationen unter der Erfassungsgrenze der Analysenmethode lagen, und deshalb in diesem Versuch eine Unsicherheit der Verteilung nicht abgeschätzt werden konnte.

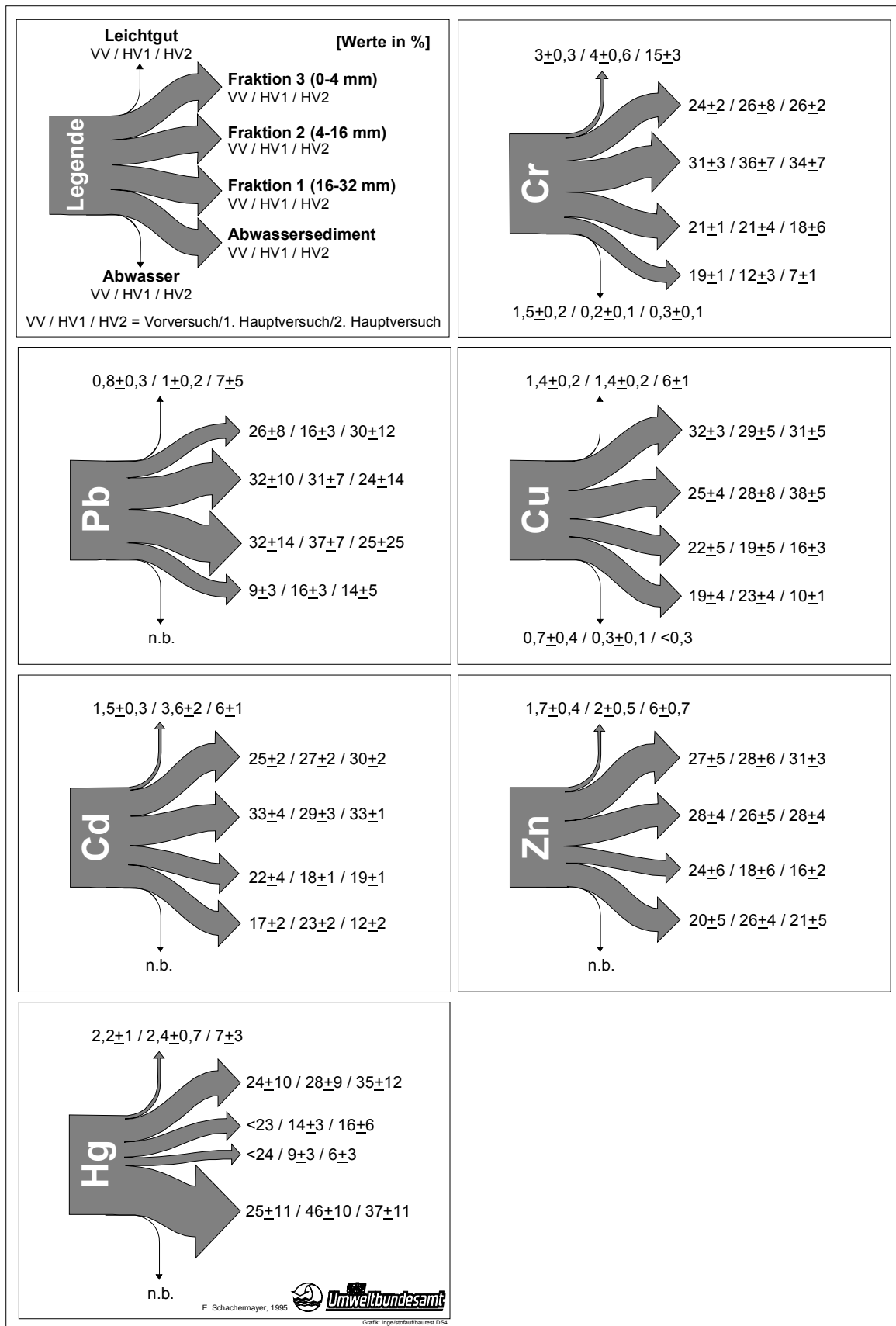


Abb. 9-5: vorsortierter Bauschutt: Prozentuelle Verteilung (inklusive Unsicherheit) der Spurenelemente bei der Aufbereitung

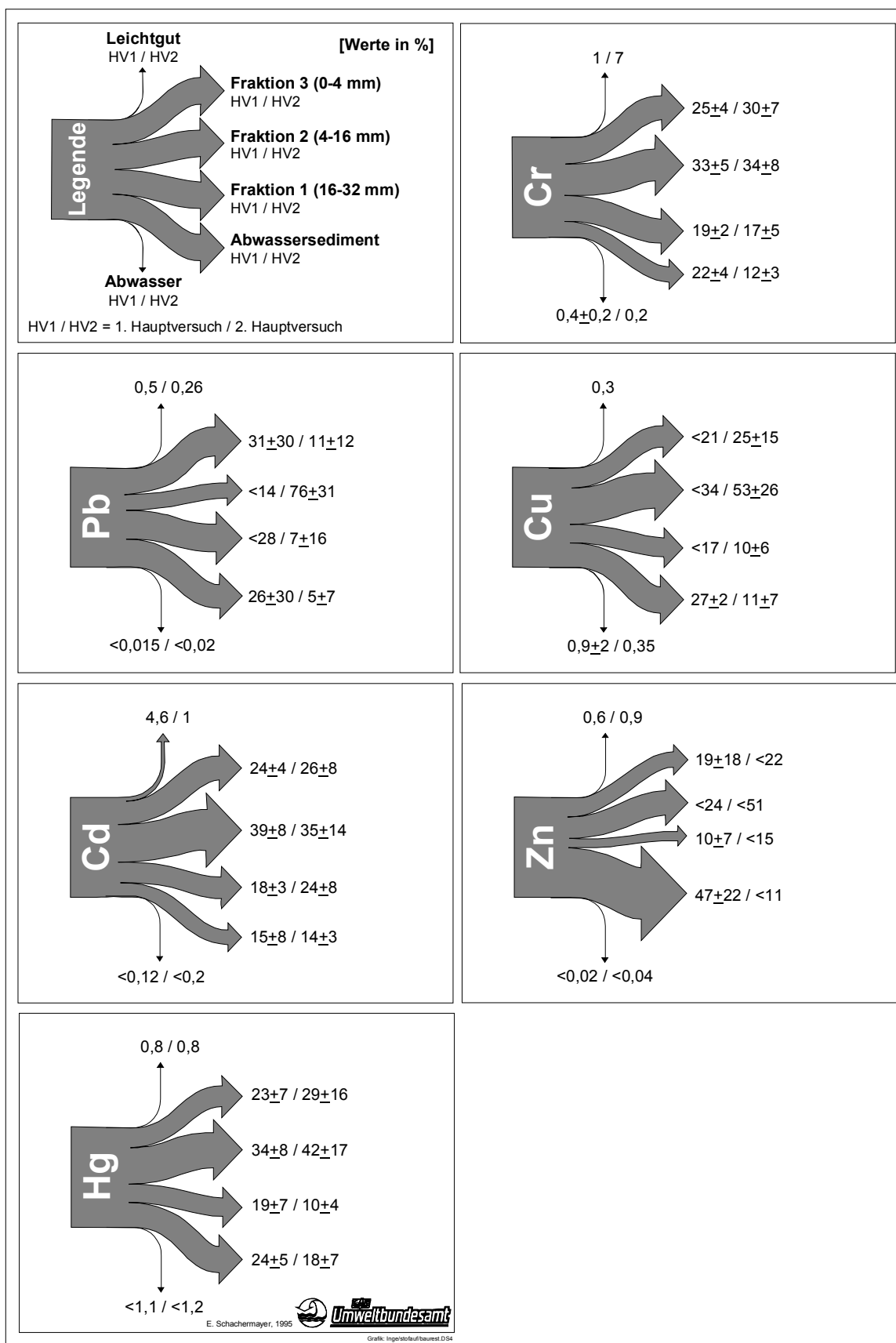


Abb. 9-6: Betonabbruch: Prozentuelle Verteilung (inklusive Unsicherheit) der Spurenelemente bei der Aufbereitung

Verteilung der Spurenelemente für das Edukt Betonabbruch

Bei den Spurenelementen überlappen sich in den Fraktionen 1, 2 und 3 die approximativen 95 %-Konfidenzintervalle beider Versuche für die Elemente **Chrom** (maximale Intervallbreite ± 8 %), **Cadmium** (maximale Intervallbreite ± 8 %) und **Quecksilber** (maximale Intervallbreite ± 17 %). **Dies bedeutet wiederum, daß die Verteilung von Chrom und Cadmium in der Anlage relativ konstant ist.** Bei Zink, Kupfer und Blei ist auf Grund der geringen Konzentrationen in den Produkten der Aufbereitung die geschätzte Verteilung mit sehr großer Unsicherheit behaftet.

- **Welche Zusammensetzung der Eingangsmaterialien läßt sich aus den Produkten der nassen Sortierung berechnen?**

Tab. 9-2: Aus dem Output aller Versuche berechnete Bandbreite der Stoffkonzentrationen von vorsortiertem Bauschutt und Betonabbruch im Vergleich mit Literaturangaben über die Betonzusammensetzung, der durchschnittlichen Zusammensetzung der Erdkruste und weiteren Grenzwerten

| Stoff | vorsortierter Bau- | Betonabbruch | | Erdkruste ² | LAGA Z.0 ³ / ÖBRV ⁴ |
|-----------------------|--------------------|------------------|------------------------|------------------------|--|
| | schutt | berechnete Werte | Literatur ¹ | mittlere Werte | Grenzwerte |
| Matrixelemente | | | | | |
| | | [g/kg] | | | |
| S | 1,1-2,9 | 1,0-2,2 | k.A.* | 0,3 | k.A./4 |
| TC | 47-79 | 71-110 | k.A. | 0,2 | k.A. |
| TIC | 35-69 | 68-99 | k.A. | k.A. | k.A. |
| TOC | 2-21 | 1,4-19 | k.A. | k.A. | k.A. |
| Si | 100-150 | 48-120 | k.A. | 280 | k.A. |
| Ca | 120-200 | 200-230 | k.A. | 41 | k.A. |
| H ₂ O | 60-140 | 30-65 | k.A. | k.A. | k.A. |
| Al | 8-15 | 3,4-6,1 | 3,9-4,7 | 81 | k.A. |
| Fe | 7-20 | 3,1-10 | k.A. | 54 | k.A. |
| Spurenelemente | | | | | |
| | | [mg/kg] | | | |
| Zn | 24-66 | 2,0-70 | 10-50 | 70 | 120 |
| Pb | 3-103 | 0-69 | 5-50 | 13 | 100 |
| Cr | 13-32 | 8-18 | 5-50 | 100 | 50 |
| Cu | 8-23 | 0,7-27 | 5-30 | 50 | 40 |
| Cd | 0,10-0,22 | 0,06-0,3 | 0,05-0,5 | 0,1 | 0,6 |
| Hg | 0,05-0,55 | 0,01-0,08 | k.A. | 0,02 | 0,3 |

*...k.A.....keine Angaben

¹...Lechner et al. 1991

²...Krauskopf 1985

³...LAGA 1995 Zuordnungswerte Feststoff für Recyclingbaustoffe; Obergrenze für den uneingeschränkten Einbau

⁴...ÖBRV 1995 Obergrenze für aus dem Hochbau gewonnene Recycling Baustoffe

Aus dem Vergleich zwischen der durchschnittlichen Zusammensetzung der Erdkruste und den berechneten Stoffkonzentrationen im Input ist zu erkennen, daß es sich um ein sehr „sauberes“ Material handeln muß. Von den untersuchten Spurenelementen überschreiten nur Blei und Quecksilber die Gehalte in der Erdkruste um eine Größenordnung, Cadmium

liegt im Betonabbruch bis zu dreimal höher konzentriert vor. Die anderen Spurenelementkonzentrationen liegen im Bereich der Erdkruste (Zink) oder unterschreiten sie sogar (Chrom und Kupfer). Die Erdkruste enthält rund 5 mal soviel Eisen und rund 10 mal soviel Aluminium, dafür rund 300 mal weniger Kohlenstoff, 10 mal weniger Schwefel und 5 mal weniger Kalzium als die untersuchten Baurestmassen.

Die berechnete Betonzusammensetzung stimmt gut mit Konzentrationswerten aus der Literatur überein.

- **Wie werden Stoffe in den Produkten der nassen Aufbereitung angereichert bzw. vermindert?**

Sowohl bei der Aufbereitung von vorsortiertem Bauschutt als auch von Betonabbruch ist die Anreicherung von Eisen im Eisenschrott mit einem Faktor von rund 90 bzw. rund 120 am größten. Bei der nassen Aufbereitung beider Eingangsmaterialien reichert sich der organische Kohlenstoff bevorzugt im Leichtgut an, wobei der Faktor bei sortiertem Bauschutt in den durchgeführten Versuchen zwischen 9 und 17 liegt und bei Betonabbruch 32 bzw. 6 beträgt. Für nahezu alle Spurenelemente des vorsortierten Bauschutts ist eine geringfügige Anreicherung (von Faktor 1,3 bis 4) im Leichtgut zu erkennen, bei Betonabbruch kann im Hauptversuch 1 im Leichtgut für Cadmium eine rund 20fache Anreicherung, im Hauptversuch 2 eine rund 8fache Anreicherung für Chrom festgestellt werden. Im Abwassersediment liegen alle Spurenelemente, aber auch in beinahe allen Versuchen der organische Kohlenstoff angereichert vor; bei Quecksilber ist eine maximale Anreicherung um den Faktor 9 zu beobachten.

Die drei wiederverwerteten Fraktionen 1 (16-32 mm), 2 (4-16 mm) und 3 (0-4 mm) weisen im Vorversuch und im ersten Hauptversuch, mit Ausnahme von Blei, eine geringere Belastung mit Spurenelementen auf als das Eingangsmaterial. Im zweiten Hauptversuch finden allerdings sowohl bei der Aufbereitung von vorsortiertem Bauschutt als auch von Betonabbruch geringfügige Anreicherungen (Faktor rund 1,2) einzelner Spurenelemente in allen drei Fraktionen statt.

Im Abwasser sind rund 15 % des Schwefels, der über die Edukte in die Anlage gelangt, in Form von Sulfat gelöst; als Folge davon können in Einzelfällen die Abwässer den in der allg. Abwasseremissionsverordnung festgelegten Grenzwert von 200 mg/l Sulfat für die Einleitung in eine öffentliche Kanalisation überschreiten.

- **Wie wird die stoffliche Qualität der Sortierprodukte der nassen Aufbereitung durch das Eingangsmaterial beeinflusst?**

Auf Grund der im vorhergehenden Absatz beschriebenen Anreicherungsverfahren während der nassen Aufbereitung ist vorhersehbar, wie sich die stoffliche Qualität der Produkte mit dem Input verändert. Die durchgeführten Versuche zeigen, daß erhöhte Spurenelementgehalte im Input, wie z. B. Quecksilber im Eingangsmaterial „vorsortierter Bauschutt“ beim Hauptversuch 2, zu einer Belastung des Abwassersediments führen, so daß dieses die Grenzwerte für Bodenaushubdeponie bzw. Baurestmassendeponie überschreitet (Tab. 9-3). Des weiteren geht aus den Untersuchungen hervor, daß hohe Spurenelementgehalte im Input (z. B. Blei) durch die Aufbereitung nicht von den verwertbaren Fraktionen ferngehalten werden können.

- **Existiert eine Sensitivität der Transferkoeffizienten bezüglich der Edukte für die untersuchte Anlage?**

Aus den in diesem Projekt gewonnenen Ergebnissen läßt sich für die Matrixelemente kein Einfluß des Inputmaterials auf die Transferkoeffizienten ableiten. Eine Ausnahme macht das Element Eisen: es findet sich bei der Aufbereitung von sortiertem Bauschutt je nach Versuch zu 11 bis 25 % im Eisenschrott wieder, bei der Aufbereitung von Betonabbruch jedoch zu 27 bzw. 41 %. Dies könnte auf den hohen Anteil elementaren Eisens in der Betonarmierung zurückzuführen sein.

Eine Abhängigkeit der Verteilung der Spurenelemente vom Input läßt sich beim Element Quecksilber erkennen, das sich bei der Aufbereitung von Betonabbruch zu einem doppelt so hohen Prozentsatz in der Fraktion 2 (4-16 mm) wiederfindet als bei vorsortiertem Bauschutt. Bei Chrom und Cadmium läßt sich keine Abhängigkeit der Verteilung vom Input erkennen und für die Elemente Zink, Kupfer und Blei lassen sich auf Grund der geringen Konzentrationen in den Produkten der Betonabbruchaufbereitung keine zuverlässigen Aussagen ableiten.

- **Sind die nicht verwertbaren Produkte der nassen Aufbereitung für eine Ablagerung geeignet, und wenn nicht, welche Vorbehandlung ist notwendig?**

Als nicht verwertbare Produkte der Aufbereitung, die derzeit i. a. einer Ablagerung zugeführt werden, sind

- das Leichtgut
- das Abwassersediment sowie
- die händisch aussortierten Hölzer und Kunststoffe

anzusehen. Die über Magnetabscheider getrennten Metalle werden dem Altmetallhandel zugeführt, für sie kommt eine Ablagerung nicht in Frage.

Als Kriterium wird das Einhalten der Grenzwerte für die stofflichen Gesamtgehalte gemäß Deponieverordnung (Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie 1996) angesetzt. Wobei die Gütergruppe „Holz und Kunststoff“ im Rahmen des Projektes nicht beprobt wurde. Es ist aber aufgrund der Affinität dieser Gütergruppe zum „Leichtgut“ anzunehmen, daß die Grenzwerte der Deponieverordnung für den organischen Kohlenstoff überschritten werden.

Der Vergleich zwischen den in der Deponieverordnung begrenzten elementaren Konzentrationen und den Wertebereichen der Mittelwerte aus allen Versuchen für Bauschutt und Betonabbruch (Tab. 9-3) zeigt, daß die Gütergruppe „Leichtgut“ aufgrund des hohen Anteils an organischem Kohlenstoff jedenfalls vor der Deponierung einer thermischen Behandlung bedarf.

Das Abwassersediment aus der Aufbereitung von Bauschutt weist gegenüber jenem aus der Aufbereitung von Betonabbruch erhöhte Gehalte an organischem Kohlenstoff auf. Die Ablagerung des Abwassersedimentes aus der Aufbereitung von Bauschutt auf einer Bodenaushub- oder Baurestmassendeponie muß einerseits wegen der hohen TOC Gehalte, andererseits wegen der Überschreitungen des Grenzwertes von Quecksilber abgelehnt werden. Auch andere, im Bereich der Grenzwerte liegende Schwermetall-Gehalte geben einen Hinweis darauf, daß dieses Material auf derartigen Deponien nicht abzulagern ist. Eine Ablagerung des Abwassersedimentes auf Massenabfalldeponien wird i.a. möglich sein. Eine Verfestigung des Abwassersediments (Konsistenz!) wäre im Rahmen einer Konditionierung sinnvoll.

Tab. 9-3: In der Deponieverordnung begrenzte Gesamtgehalte im Vergleich mit den ermittelten Wertebereichen für Abwassersediment und Leichtgut

| Deponieverordnung 1996 | | | Wertebereiche für Abwasser- sediment und Leichtgut | |
|---------------------------|---|--------------------------|---|------------------------|
| Element | Grenzwert Gesamtgehalt | | Eingangsmaterial Bauschutt | |
| | Bodenaushubdeponie/ Baurestmassendeponie | Massenabfall- deponie | Abwasser- sediment | Leichtgut |
| | [mg/kgTS] | [mg/kgTS] | [mg/kgTS] | [mg/kgTS] |
| Kohlenstoff org. | 20.000/30.000 | 50.000 | 19.000-51.000 | 100.000-190.000 |
| Chrom | 300/500 | 5.000 | 33-41 | 54-110 |
| Kupfer | 100/500 | 5.000 | 22-45 | 15-30 |
| Zink | 500/1.500 | 5.000 | 110-200 | 65-84 |
| Cadmium | 2/10 | 30 | 0,31-0,62 | 0,2-0,6 |
| Quecksilber | 1/3 | 20 | 0,26-3,1 | 0,14-0,7 |
| Blei | 150/500 | 3.000 | 67-85 | 25-56 |
| Element | Grenzwert Gesamtgehalt | | Eingangsmaterial Betonabbruch | |
| | Bodenaushubdeponie/ Baurestmassendeponie | Massenabfall- deponie | Abwasser- sediment | Leichtgut |
| | [mg/kgTS] | [mg/kgTS] | [mg/kgTS] | [mg/kgTS] |
| Kohlenstoff org. | 20.000/30.000 | 50.000 | 14.000-15.000 | 21.000-370.000 |
| Chrom | 300/500 | 5.000 | 32-33 | 53-114 |
| Kupfer | 100/500 | 5.000 | 28-31 | 13-17 |
| Zink | 500/1.500 | 5.000 | 70-230 | 36-96 |
| Cadmium | 2/10 | 30 | 0,31-0,48 | 0,17-5 |
| Quecksilber | 1/3 | 20 | 0,14-0,18 | 0,04-0,22 |
| Blei | 150/500 | 3.000 | 23-130 | 6,8-91 |

- **Sind der Recyclierbarkeit aus ökologischer Sicht Grenzen gesetzt?**

Aus den Untersuchungen geht hervor, daß die wiederverwerteten mineralischen Fraktionen die Deponieverordnung (Bodenaushub) im Hinblick auf Gesamtgehalte für die untersuchten Parameter erfüllen. Betrachtet man die Anreicherung/Abminderung von Stoffen in diesen Fraktionen gegenüber dem Ausgangsmaterial, so zeigt sich, daß eine Anreicherung einzelner Stoffe, z. B. von Schwermetallen, in den Produkten der Aufbereitung nicht verhindert werden kann bzw. eine gezielte Abminderung dieser Stoffe nicht erreicht wird. Es ist daher bei mehrmaligen Recyclingdurchläufen mit der Zunahme von einzelnen Stoffgehalten zu rechnen. Nachdem die Bestandsdauer der Recyclingbaustoffe im eingebauten Zustand Jahrzehnte bis Jahrhunderte erreichen kann, dieser Vorgang also sehr langfristig ist, ist ein direkter meßtechnischer Nachweis dieser qualitativen Veränderung schwer möglich. Er kann nur aus den vorhandenen Ergebnissen abgeleitet werden. In diesem Zusammenhang stofflich relevant sind beispielsweise die Parameter Chlor (Korrosion) und Schwefel (Sulfattreiben), die bereits in geringen Mengen unmittelbaren Einfluß auf die Betonqualität haben können. Diese beiden Elemente sind für Recyclingbaustoffe aus dem Hochbau in einer Richtlinie des österreichischen Baustoff Recycling Verbandes (ÖBRV, 1995) mit folgenden Werten begrenzt: Sulfat (SO₃) 1,0 M % bzw. Chloride 0,1 M %.

Stofflich kann durch die Form der nassen wie auch der trockenen Aufbereitung keine gezielte Verbesserung der Ausgangsprodukte (keine generelle Abminderung um Größenordnungen für einen Stoff, Stoffgehalte von verwertbaren und nicht verwertbaren Fraktionen unterscheiden sich nicht um Größenordnungen; Bindungsformen der Stoffe ändern sich nur zu geringen Anteilen) erreicht werden. Das bedeutet: der Input in die Anlagen bestimmt stofflich das Endprodukt. Qualitätsverbessernde Maßnahmen sind daher bereits vor der Aufbereitung zu setzen. Die Anreicherung/Abminderung zeigt deutlich, daß beispielsweise bei hohen Bleigehalten im Input diese nicht mit der Anlagenkonzeption der Naßaufbereitung aus den verwertbaren Fraktionen entfernt werden können.

- ***Wo liegen die wesentlichen Unterschiede zwischen nassen und trockenen Behandlungsverfahren?***

Bei dem untersuchten nassen Behandlungsverfahren entstehen im Vergleich zur trockenen Aufbereitung zwei zusätzliche Produkte, nämlich Abwasser und Abwassersediment. Das Abwasser löst rund 15 % des Schwefels, der über die Edukte in die Anlage gelangt, in Form von Sulfat; deshalb liegen die Schwefelkonzentrationen in den mineralischen Produkten der nassen Aufbereitung durchwegs niedriger als in denjenigen der trockenen Verfahren (siehe Tab. 8-14).

Bei der nassen Aufbereitung finden sich die höchsten Konzentrationen der untersuchten Spurenelemente im Abwassersediment, der Fraktion mit den kleinsten Korngrößen; bei den übrigen Fraktionen kann eine Korngrößenabhängige Belastung mit Spurenelementen nicht festgestellt werden. Im Gegensatz dazu sind die Spurenelementgehalte der Fraktionen bei den beschriebenen trockenen Verfahren abhängig von der Korngröße: je kleiner die Korngröße, desto höher die Konzentration.

10 ZUSAMMENFASSUNG

Ziele

Die vorliegende Arbeit hatte folgende Ziele:

- Die Ermittlung der stofflichen Zusammensetzung von Baurestmassen durch die Analyse der Produkte eines nassen Aufbereitungsverfahrens
- Die Beurteilung der stofflichen Qualität der produzierten Fraktionen
- Den Vergleich von nasser und trockener Aufbereitung von Baurestmassen bezüglich der Güter- und Stoffflüsse und der Verteilung der Stoffe auf die einzelnen Fraktionen

Um diese Ziele zu erreichen wurde zunächst eine nasse Aufbereitungsanlage für Baurestmassen ausgewählt, auf der die Untersuchungen durchgeführt werden sollten; die Sortier- und Zerkleinerungsprozesse, die das Eingangsmaterial in dieser Anlage durchläuft wurden anhand einer Systemdefinition dargestellt (siehe Abb. 4-1) und die Produkte, die die Anlage verlassen ermittelt.

Vorgehen

Die Anlage wurde insgesamt drei mal beprobt (siehe Tab. 10-1), wobei der erste Versuch (Vorversuch) dazu diente, die Inhomogenität der Sortierfraktionen (Schwankungsbreite der untersuchten Elemente) kennenzulernen und daraus die optimale Probenanzahl für eine gewünschte Genauigkeit (95 % Konfidenzintervall mit einer relativen Breite von ± 10 % bezogen auf das arithmetische Mittel der Stoffkonzentrationen) zu berechnen. Die tatsächliche Probenanzahl, die für die beiden weiteren Versuche (Hauptversuch 1 und Hauptversuch 2) gewählt wurde, stellt einen Kompromiß dar zwischen dem statistisch bestimmten Optimum und den verfügbaren finanziellen Mitteln.

Beide Hauptversuche bestanden aus zwei unabhängigen Subversuchen (1a bzw. 2a und 1b bzw. 2b), bei denen unterschiedliche Eingangsmaterialien aufbereitet wurden, nämlich Bauschutt und Betonabbruch. Beide Materialien stammten ausschließlich aus dem Hochbau und wurden gemäß der Trennverordnung für Baurestmassen (Bundesministerium f. Umwelt, Jugend und Familie 1991) gewonnen. Beim angelieferten Bauschutt wurden vor der Aufbereitung große Stücke von Holz, Metall und Kunststoffen aussortiert, weshalb dieses Material in der Folge als vorsortierter Bauschutt bezeichnet wird.

Tab. 10-1: Schema der Beprobung der Anlage

| | Vorversuch | Hauptversuch 1 (a + b) | Hauptversuch 2 (a+b) |
|--------------------------------|--|---|---|
| Datum der Probenahme | 14/15.11 1995 | 21.5.1996 | 8.4.1997 |
| Eingangsmaterialien | vorsortierter Bauschutt | 1a vorsortierter Bauschutt 1b Betonabbruch | 2a vorsortierter Bauschutt 2b Betonabbruch |
| Beprobte Güter | Fraktion 1 (Korngrößen 16-32 mm) Fraktion 2 (Korngrößen 4-16 mm) Fraktion 3 (Korngrößen 0-4 mm) Leichtgut Abwasser Abwassersediment | | |
| Anzahl der Mischproben pro Gut | 5 | 5 bzw. 1 (für Leichtgut bei den Versuchen 1b und 2b) | |
| Probengröße pro Mischprobe | rund 4 kg | | |

Die gesamte Probenaufbereitung und Analytik (bestimmt wurden die Gesamtgehalte der Elemente S, C, Si, Cl, Ca, Al, Fe, Zn, Pb, Cr, Cu, Cd, Hg in jedem beprobten Gut) wurde vom Labor des Umweltbundesamtes durchgeführt.

Ergebnisse: Massenbilanzen

Für jeden der einzelnen Versuche wurde eine Massenbilanz erstellt; die folgende Abbildung zeigt eine Zusammenfassung der durchgeführten Bilanzen für beide Eingangsmaterialien (Bauschutt und Betonabbruch) und die Jahresbilanz nach Angabe der Betreiber.

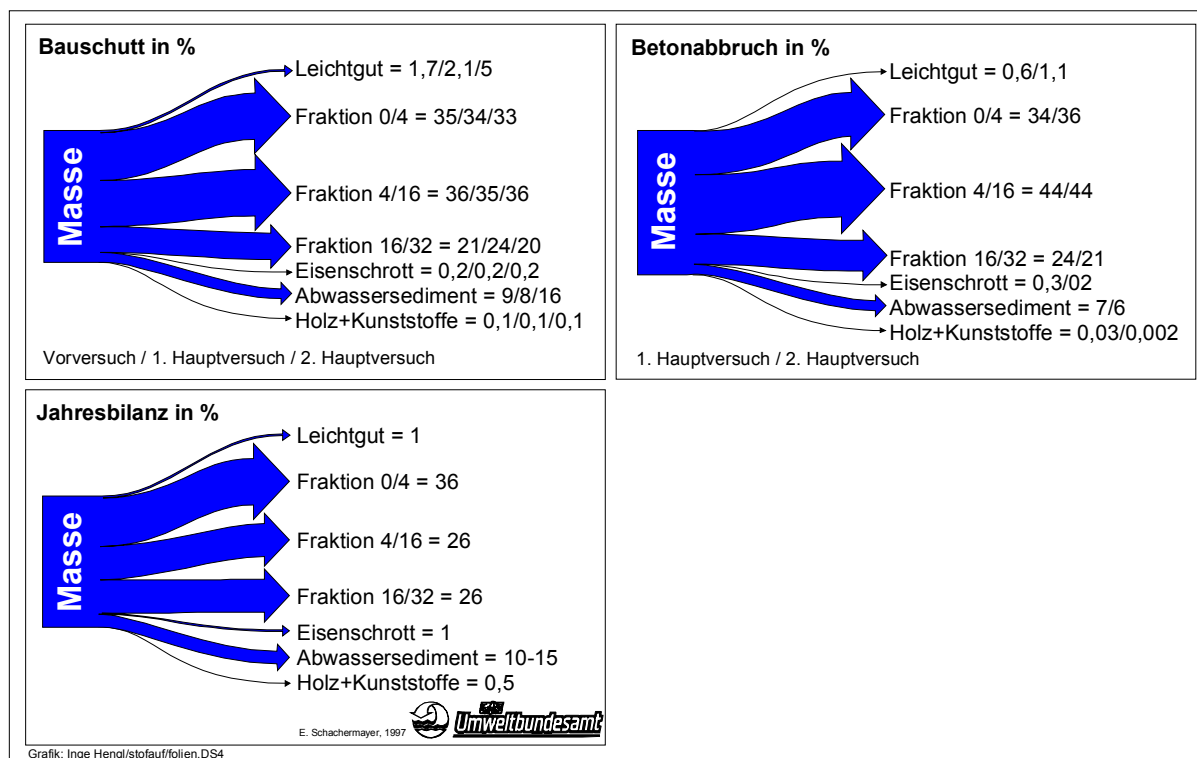


Abb. 10-1: Massenbilanzen der Anlage

Die Produkte der Aufbereitung haben einen höheren Wassergehalt als das Eingangsmaterial; auf Grund dessen liegt die Summe der Massenanteile der Produkte bei den durchgeführten Versuchen über 100 %. Im Vergleich zur Jahresbilanz der Anlage konnten bei den durchgeführten Versuchen durchwegs geringere Anteile der Produkte „Eisenschrott“ und „Holz und Kunststoffe“ festgestellt werden; die Massenanteile von Leichtgut und den mineralischen Fraktionen sind einander in allen Bilanzen sehr ähnlich mit Ausnahme der Fraktion 4/16, die beim Eingangsmaterial Betonabbruch 44 % ausmacht; die Zuschlagstoffe des Betons liegen in dieser Korngruppe und sind für den hohen Massenanteil verantwortlich.

Ergebnisse : Stoffkonzentrationen

Die folgenden Tabellen zeigen die Wertebereiche der untersuchten Gesamtgehalte für die wiederverwertbaren Sortierfraktionen aus aufbereitetem Bauschutt und Betonabbruch für alle durchgeführten Versuche.

Tab. 10-2: Wertebereiche der untersuchten Gesamtgehalte der Sortierfraktionen aus aufbereitetem Bauschutt

| wiederverwertbare Sortierfraktionen aus aufbereitetem vorsortiertem BAUSCHUTT | | | | | |
|---|--------------------------------|-------------|--------------|--|--|
| Stoffe | 0/4 (n=15) | 4/16 (n=15) | 16/32 (n=15) | Erdkruste/ Bachsedimente ¹ | ÖBRV ² /LAGA (1995) Z.O ³ |
| Matrix | [g/kg Trockensubstanz] | | | | |
| S | 1,4-2 | 1,3-2 | 1,6-2,4 | 0,3/k.A. | 4 |
| TC | 59-83 | 59-75 | 54-68 | 0,2/k.A. | k.A. |
| TIC | 47-76 | 52-66 | 53-62 | | k.A. |
| TOC | 6,8-14 | 7-9,8 | 1,8-7,8 | | k.A. |
| Si | 120-190 | 130-170 | 160-170 | 280/k.A. | k.A. |
| Cl _{ges} | <1,5 | <1,5 | <1,5 | 0,13/k.A. | 1 |
| Ca | 140-210 | 160-210 | 160-210 | 41/k.A. | k.A. |
| Al | 6,6-11 | 8,6-15 | 9-15 | 81/92 | k.A. |
| Fe | 6,9-16 | 7,8-16 | 8-15 | 54/4 | k.A. |
| Spuren | [mg/kg Trockensubstanz] | | | | |
| Zn | 34-44 | 29-42 | 30-61 | 70/77 | k.A./ 120 |
| Pb | 21-56 | 16-64 | 30-110 | 13/25 | k.A./ 100 |
| Cr | 13-25 | 15-25 | 17-24 | 100/73 | k.A./ 50 |
| Cu | 11-22 | 8-21 | 10-16 | 50/21 | k.A./ 40 |
| Cd | 0,13-0,2 | 0,11-0,2 | 0,12-0,2 | 0,1/k.A. | k.A./ 0,6 |
| Hg | 0,06-0,47 | 0,04-0,17 | 0,04-0,11 | 0,02/k.A. | k.A./ 0,3 |

n Probenanzahl;

¹ Mittelwerte der Gehalte österreichischer Bachsedimente der Zentralzone

² Richtlinie für Recycling-Baustoffe aus Hochbau-Restmassen;
Anwendungsbereich: zementgebundene Massen

³ Zuordnungswerte Feststoff für Recyclingbaustoffe bzw. nicht aufbereiteten Bauschutt,
Obergrenze für den uneingeschränkten Einbau

Die Konzentrationsunterschiede der jeweils fünfzehn untersuchten Fraktionen pro Korngruppe sind groß (oft $\pm 50\%$), ihr Schadstoffgehalt (siehe Vergleich zur mittleren Erdkruste bzw. Bachsedimenten) allerdings sehr gering. Zwischen den Korngruppen besteht kaum ein Unterschied in der Belastung mit Spurenelementen. Die Schadstoffgehalte der wiederverwertbaren Sortierfraktionen aus aufbereitetem Betonabbruch (siehe Tab. 10-3) liegen durchwegs noch unter denjenigen aus vorsortiertem Bauschutt. *Das bedeutet, die für ein Recycling verwendbaren Produkte der Anlage sind sehr sauber.*

Tab. 10-3: Wertebereiche der untersuchten Gesamtgehalte der Sortierfraktionen aus aufbereitetem Betonabbruch

| wiederverwertbare Sortierfraktionen aus aufbereitetem BETONABBRUCH | | | | | |
|--|--------------------------------|-------------|--------------|------------------------------|--|
| Stoffe | 0/4 (n=15) | 4/16 (n=15) | 16/32 (n=15) | Erdkruste/ Bachsedimente* | ÖBRV ² /LAGA (1995) Z.O ³ |
| Matrix | [g/kg Trockensubstanz] | | | | |
| S | 1,3-1,4 | 1-1,4 | 1,4-1,8 | 0,3/k.A. | 4 |
| TC | 84-98 | 83-100 | 78-96 | 0,2/k.A. | k.A. |
| TIC | 82-86 | 81-97 | 75-77 | | k.A. |
| TOC | 2,5-12 | 2,7-3,4 | 3-19 | | k.A. |
| Si | 73-120 | 60-110 | 70-120 | 280/k.A. | k.A. |
| Cl _{ges.} | n.b. | n.b. | n.b. | 0,13/k.A. | 1 |
| Ca | 220-230 | 230-240 | 230-240 | 41/k.A. | k.A. |
| Al | 3,9-4,4 | 3-4,4 | 4-4,8 | 81/92 | k.A. |
| Fe | 4-5,9 | 4-5,3 | 4-6,4 | 54/4 | k.A. |
| Spuren | [mg/kg Trockensubstanz] | | | | |
| Zn | 23-28 | 20-44 | 15-27 | 70/77 | k.A./ 120 |
| Pb | 8,8-38 | 13-42 | <8-8,5 | 13/25 | k.A./ 100 |
| Cr | 9-15 | 8-11 | 9-12 | 100/73 | k.A./ 50 |
| Cu | <5-12 | <5-17 | <5-7,3 | 50/21 | k.A./ 40 |
| Cd | 0,11-0,2 | 0,1-0,2 | 0,15-0,18 | 0,1/k.A. | k.A./ 0,6 |
| Hg | 0,04 | 0,04 | 0,02-0,04 | 0,02/k.A. | k.A./ 0,3 |

n Probenanzahl;

¹ .Mittelwerte der Gehalte österreichischer Bachsedimente der Zentralzone

² Richtlinie für Recycling-Baustoffe aus Hochbau-Restmassen;
Anwendungsbereich: zementgebundene Massen

³ Zuordnungswerte Feststoff für Recyclingbaustoffe bzw. nicht aufbereiteten Bauschutt,
Obergrenze für den uneingeschränkten Einbau

Die nicht verwertbaren Produkte der Anlage, das *Abwassersediment* und das *Leichtgut*, überschreiten einzelne in der Deponieverordnung (Bundesministerium f. Umwelt, Jugend und Familie 1996) angegebene Grenzwerte für Gesamtgehalte (siehe Tab. 9-3). Auf Grund des hohen Anteils an organischem Kohlenstoff empfiehlt es sich, das *Leichtgut thermisch zu verwerten*; das *Abwassersediment* überschreitet in Einzelfällen den Grenzwert für organischen Kohlenstoff auf Massenabfalldeponien und denjenigen für Quecksilber auf Baurestmassendeponien. *Es wird empfohlen das Abwassersediment zu verfestigen.*

Die Spurenelementgehalte im *Abwasser* liegen unterhalb der Grenzwerte der allg. Abwasseremissionsverordnung; allerdings überschreitet die Sulfatkonzentration in Einzelfällen den Grenzwert für die Einleitung in eine öffentliche Kanalisation.

Ergebnisse: Verteilung der Stoffe

Die Anlage verteilt die in den Baurestmassen enthaltenen Elemente, mit Ausnahme von organischem Kohlenstoff bei allen Versuchen annähernd gleich. *Die Verteilung der Matrixelemente*, wie z. B. Silizium (siehe Abb. 10-2) *entspricht der Verteilung der Massen*; nur der organische Kohlenstoff (TOC) gelangt je nach Versuch in sehr unterschiedlichem Maße in die Outputfraktionen. Eine Erklärung hierfür ist, daß die Träger von organischem Kohlenstoff (beispielsweise Holzstückchen, restliche Kunststoff- und Verputzpartikel etc.) in den Fraktionen 1, 2 und 3 nicht homogen verteilt, und deshalb in den untersuchten Proben unterschiedlich konzentriert sind. Das Eisen des Eingangsmaterials gelangt bei der Aufbereitung zu rund 20 % in den Eisenschrott.

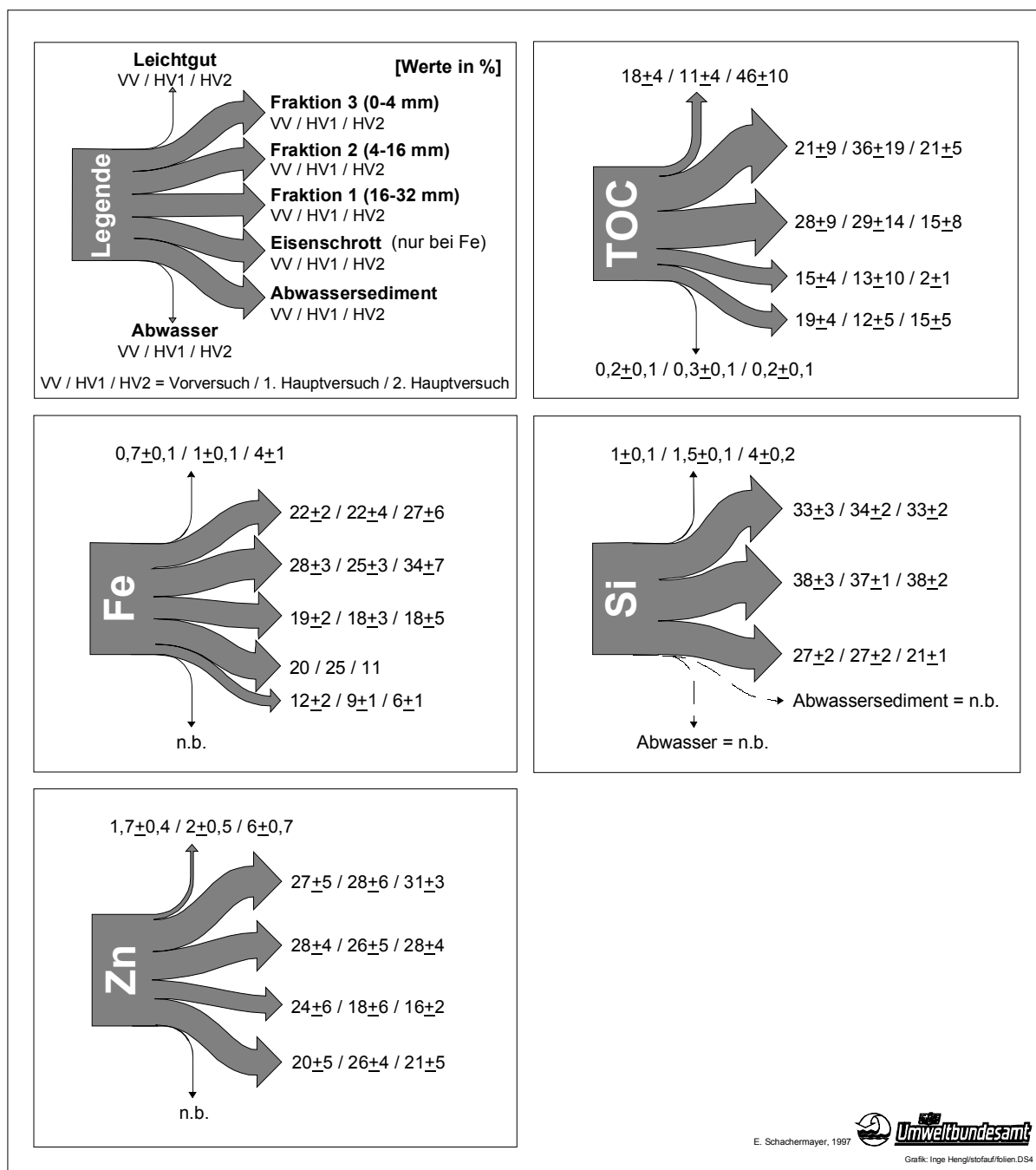


Abb. 10-2: Verteilung ausgewählter Elemente bei der Aufbereitung von vorsortiertem Bauschutt

Die *Spurenelemente* (Beispiel: Zn in Abb. 10-2) finden sich zu annähernd gleichen Teilen in den mineralischen Produkten mit den Korngruppen 0/4, 4/16, 16/32 und dem Abwassersediment wieder.

Ergebnisse: Stoffliche Qualität der produzierten Fraktionen im Vergleich zum Input

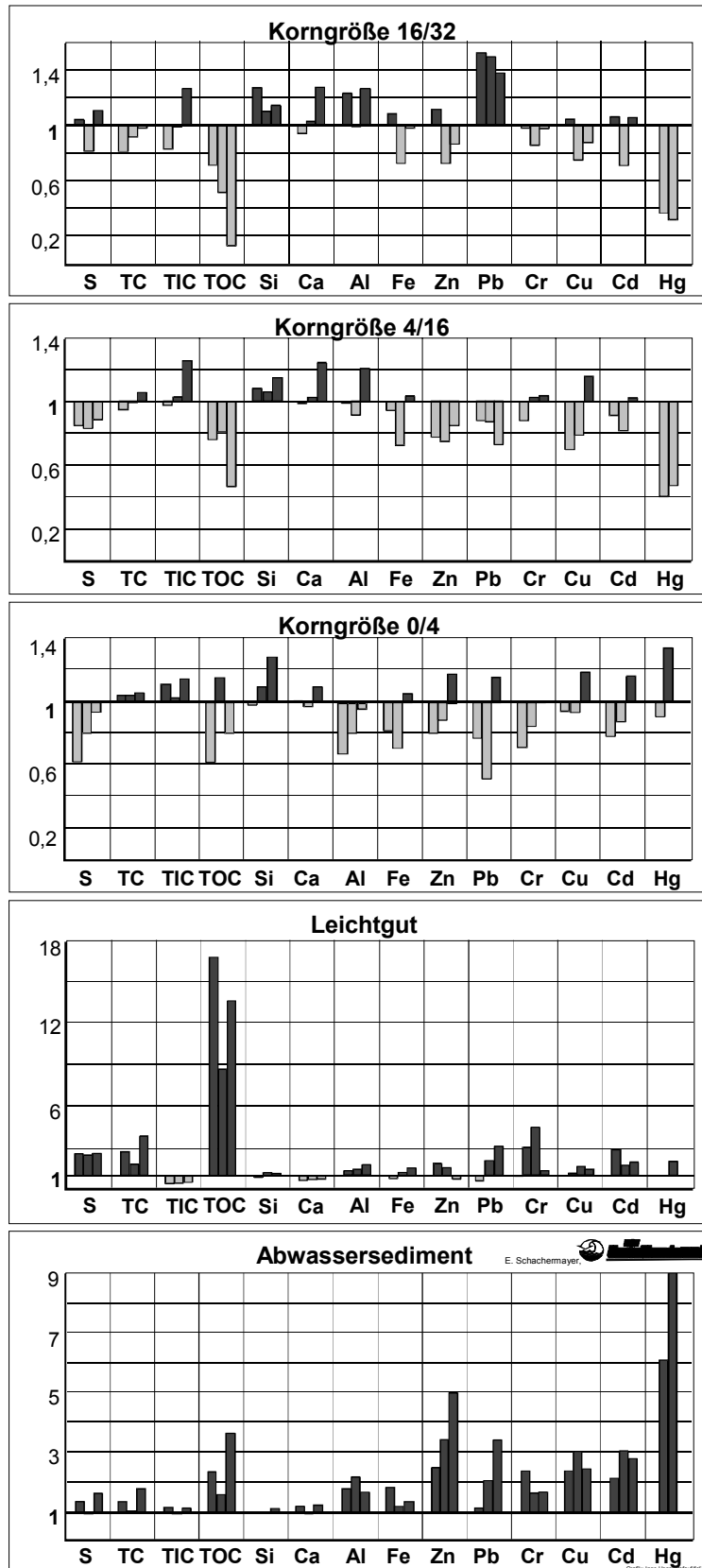


Abb. 10-3: Anreicherung der Elemente in den festen Outputfraktionen (1. Säule = Vorversuch; 2.Säule = Hauptversuch1; 3. Säule =Hauptversuch2)

Abb. 10-3 zeigt die Anreicherung der untersuchten Elementen in den Sortierfraktionen für alle durchgeführten Versuche mit vorsortiertem Bauschutt; es ist zu erkennen, daß *die stoffliche Qualität der wiederverwertbaren mineralischen Produkte durch die nasse Aufbereitung nicht gezielt verbessert werden konnte*. So reichert sich bei allen Versuchen das Blei in der Fraktion 16/32 geringfügig an, ebenso werden beim Hauptversuch 2 alle Spurenelemente in der Fraktion 0/4 geringfügig angereichert.

Deutlich zu erkennen ist die Anreicherung von organischem Kohlenstoff im Leichtgut, während im Abwassersediment alle Spurenelemente angereichert vorliegen.

Ergebnisse: Vergleich trockene und nasse Behandlungsverfahren

Der Vergleich zwischen trockenem und nassem Verfahren zeigte:

- daß *weder nasse noch trockene Verfahren gezielt die stoffliche Qualität der Sortierprodukte verbessern können*
- daß *vielmehr die stoffliche Qualität des Inputs die stoffliche Qualität der Produkte determiniert*. Bei zwei trocken gefahrenen Anlagen (BASORAG 1991, SORTAG 1993) in denen *Muldengut* aufbereitet wurde, entstanden hauptsächlich Fraktionen, die auf Grund ihrer Schadstoffbelastung für eine Wiederverwertung ungeeignet waren. Eine andere Untersuchung (Sindt et al. 1997) über die trockene Aufbereitung von *Bauschutt, welcher ausschließlich aus dem Hochbau stammte*, zeigte, daß die mineralischen Produkte abgesehen von der Korngruppe 0/4 eine sehr geringe Belastung mit Spurenelementen aufweisen. Ebenso produziert die in dieser Arbeit untersuchte nasse Anlage, in welcher ausschließlich *nach der Trennverordnung* (Bundesministerium f. Umwelt, Jugend und Familie 1991) *separierter Bauschutt und Betonabbruch* aufbereitet wird, mineralische Fraktionen, welche sich zur Wiederverwertung eignen. ⇒ *Für ein erfolgreiches Recycling von Baurestmassen ist die bestmögliche Trennung beim Abbruch auf der Baustelle notwendig.*
- daß die *Spurenelementgehalte* der mineralischen Fraktionen bei *trockenen Verfahren* *korngrößenabhängig* sind: je kleiner die Korngröße, desto höher die Konzentration.
⇒ *Durch Entfernen der belasteten Fraktionen läßt sich der Gesamtschadstoffgehalt reduzieren*. Beim *nassen Verfahren* werden die *Spurenelemente im Abwassersediment* angereichert.
- daß beide Verfahren aus Baurestmassen eine Leichtfraktion erzeugen, die thermisch zu verwerten ist.

11 LITERATUR

- BRUNNER, P. H.; STÄMPFLI, D. M. (1993): "Material Balance of a Construction Waste Sorting Plant (SORTAG)", *Waste Management & Research*, 11.
- BUNDESMINISTERIUM F. UMWELT, JUGEND UND FAMILIE (1991): "Verordnung über die Trennung von bei Bautätigkeiten anfallenden Materialien", BGBl 1991/259.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, JUGEND UND FAMILIE (1996): „Verordnung über die Ablagerung von Abfällen (Deponieverordnung), BGBl 1996/164.
- KRAUSKOPF, U.B. (1985): "Introduction to Geochemistry". Hrsg. Mc Graw-Hill Book Company, New York.
- LAGA (1995): der Länderarbeitsgemeinschaft „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen; Technische Regeln; II 1.4 Bauschutt“.
- LECHNER, P. et al. (1991): "Fachgrundlagen zur Beurteilung der Deponiefähigkeit von Bauschutt", 1 Abfallwirtschaft, BM für Umwelt, Jugend und Familie, Sektion V, Wien.
- ÖBRV Österreichischer Baustoff Recycling Verband (1995): „Richtlinie für Recycling-Baustoffe aus Hochbau-Restmassen; Anwendungsbereich zementgebundene Massen.
- SIEBER CASSINA+PARTNER; Amt für Umweltschutz und Energie Baselland (1991): "Stoffflussanalyse der Bauabfallsortieranlage BASORAG". Hrsg. Amt für Umweltschutz und EnergieKanton Basel-Landschaft, Basel.
- SINDT, V.; RUCH, M.; SCHULTMANN, F.; RENTZ, O. (1997): "Möglichkeiten zur Verbesserung der Umweltverträglichkeit aufbereiteter Hochbaurestmassen", *Müll und Abfall*, 4, p. 192-200.
- WALKER, I.; DOHMANN, M. (1994): "Grundlagenuntersuchungen zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Bauschutt und Baustellenabfällen". Hrsg. Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen.

12 ANHANG

| | | |
|-------------|--|--------|
| Tab. 12-1: | Vorversuch Vorsortierter Bauschutt: Stoffkonzentrationen im Abwasser | 82 |
| Tab. 12-2: | Vorversuch vorsortierter Bauschutt: Stoffkonzentrationen bezogen auf Trockensubstanz | 83, 84 |
| Tab. 12-3: | Vorversuch Vorsortierter Bauschutt: Stoffflüsse | 85 |
| Tab. 12-4: | Vorversuch Vorsortierter Bauschutt: Transferkoeffizienten | 86 |
| Tab. 12-5: | Hauptversuch 1 Vorsortierter Bauschutt: Stoffkonzentrationen im Abwasser | 86 |
| Tab. 12-6: | Hauptversuch 1 Vorsortierter Bauschutt: Stoffkonzentrationen bezogen auf Trockensubstanz | 87, 88 |
| Tab. 12-7: | Hauptversuch 1 Vorsortierter Bauschutt: Stoffflüsse | 89 |
| Tab. 12-8: | Hauptversuch 1 Vorsortierter Bauschutt: Transferkoeffizienten | 90 |
| Tab. 12-9: | Hauptversuch 1 Betonabbruch: Stoffkonzentrationen im Abwasser | 90 |
| Tab. 12-10: | Hauptversuch 1 Betonabbruch: Stoffkonzentrationen bezogen auf Trockensubstanz | 91, 92 |
| Tab. 12-11: | Hauptversuch 1 Betonabbruch: Stoffflüsse | 93 |
| Tab. 12-12: | Hauptversuch 1 Betonabbruch: Transferkoeffizienten | 94 |
| Tab. 12-13: | Hauptversuch 2 Vorsortierter Bauschutt: Stoffkonzentrationen im Abwasser | 94 |
| Tab. 12-14: | Hauptversuch 2 Vorsortierter Bauschutt: Stoffkonzentrationen bezogen auf Trockensubstanz | 95, 96 |
| Tab. 12-15: | Hauptversuch 2 Vorsortierter Bauschutt: Stoffflüsse | 97 |
| Tab. 12-16: | Hauptversuch 2 Vorsortierter Bauschutt: Transferkoeffizienten | 98 |
| Tab. 12-17: | Hauptversuch 2 Betonabbruch: Stoffkonzentrationen im Abwasser | 99 |
| Tab. 12-18: | Hauptversuch 2 Betonabbruch: Stoffkonzentrationen bezogen auf Trockensubstanz | 100 |
| Tab. 12-19: | Hauptversuch 2 Betonabbruch: Stoffflüsse | 101 |
| Tab. 12-20: | Hauptversuch 2 Betonabbruch: Transferkoeffizienten | 102 |

Tab. 12-1: Vorversuch Vorsortierter Bauschutt: Stoffkonzentrationen im Abwasser

| | TOC [mg/l] | Chlorid [mg/l] | Sulfat [mg/l] | Ca [mg/l] | Al [µg/l] | Cd [µg/l] | Cr [µg/l] | Cu [µg/l] | Fe [µg/l] | Zn [µg/l] | Pb [µg/l] | Hg [µg/l] |
|--------------------|---------------|-------------------|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Abwasser 1 | 2,05 | 3,35 | 72,9 | 30,9 | 252 | <0,05 | 30,8 | <2,5 | 69 | <4 | 8,3 | <0,5 |
| Abwasser 2 | 3,45 | 5,41 | 103 | 80,1 | 491 | <0,05 | 39,7 | 8 | 27 | <8 | <1 | <0,5 |
| Abwasser 3 | 3,25 | 5,12 | 105 | 70,3 | 521 | <0,05 | 38,7 | 4 | 24 | <4 | <1 | <0,5 |
| Abwasser 4 | 6,45 | 11,6 | 176 | 117 | 402 | <0,05 | 47,7 | 18 | 11 | <4 | <1 | <0,5 |
| Abwasser 5 | 8,25 | 12,2 | 224 | 120 | 404 | <0,05 | 44,8 | 21 | 50 | <4 | <1 | <0,5 |
| Mittelwert | 4,7 | 7,5 | 136,1 | 83,8 | 414,0 | <0,05 | 40,3 | 12,7 | 36,0 | <4 | <1 | <0,5 |
| Standardabweichung | 2,3 | 3,6 | 55,5 | 33,0 | 93,5 | | 5,8 | 7,3 | 20,6 | | | |
| obere Grenze | 7,5 | 12,0 | 205,0 | 124,8 | 530,0 | | 47,5 | 21,8 | 61,6 | | | |
| untere Grenze | 1,8 | 3,0 | 67,3 | 42,8 | 297,9 | | 33,2 | 3,6 | 10,5 | | | |

Tab. 12-2: Vorversuch vorsortierter Bauschutt: Stoffkonzentrationen bezogen auf Trockensubstanz

| | S | TC | TIC | TOC | Si | Ca | Al | Fe | Zn | Pb | Cr | Cu | Cd | Hg |
|-----------------------|------|------|------|------|-------|---------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] |
| Fraktion 3 | 0,11 | 8,9 | 7,6 | 1,3 | 11,4 | 207 | 5,8 | 6,6 | 40 | 41 | 12 | 12 | 0,16 | 0,06 |
| Korngröße 0/4 | 0,12 | 9,1 | 8,5 | 0,6 | 10,3 | 216 | 6,1 | 6,2 | 35 | 38 | 11,9 | 12 | 0,15 | 0,06 |
| | 0,18 | 7,6 | 6,8 | 0,8 | 14,1 | 202 | 7,5 | 8,0 | 61 | 72 | 14,3 | 11 | 0,13 | 0,06 |
| | 0,15 | 7,8 | 7,3 | 0,5 | 12,5 | 207 | 6,6 | 7,0 | 44 | 75 | 11,9 | 11 | 0,14 | 0,07 |
| | 0,16 | 7,9 | 7,7 | 0,2 | 11,9 | 212 | 6,8 | 6,6 | 39 | 54 | 12,4 | 9 | 0,14 | 0,05 |
| Mittelwert | 0,14 | 8,26 | 7,58 | 0,68 | 12,0 | 209,0 | 6,55 | 6,87 | 43,80 | 56,00 | 12,50 | 10,90 | 0,14 | 0,06 |
| Standardabweichung | 0,03 | 0,62 | 0,56 | 0,37 | 1,26 | 4,73 | 0,59 | 0,61 | 9,06 | 15,30 | 0,92 | 1,07 | 0,01 | 0,01 |
| obere Grenze | 0,18 | 9,02 | 8,27 | 1,13 | 13,60 | 214,85 | 7,28 | 7,63 | 55,05 | 74,99 | 13,64 | 12,23 | 0,16 | 0,07 |
| untere Grenze | 0,11 | 7,50 | 6,89 | 0,23 | 10,48 | 203,11 | 5,82 | 6,11 | 32,55 | 37,01 | 11,36 | 9,57 | 0,13 | 0,05 |
| optimale Probenanzahl | 12 | 2 | 2 | 111 | 4 | 1 | 3 | 3 | 16 | 29 | 2 | 4 | 2 | 4 |
| Fraktion 2 | 0,18 | 8,1 | 7,5 | 0,6 | 10,7 | 217 | 8,0 | 6,0 | 36 | 41 | 12,1 | 6 | 0,13 | <0,05 |
| Korngröße 4/16 | 0,23 | 6,6 | 6,4 | 0,2 | 14,7 | 193 | 10,5 | 8,6 | 40 | 71 | 16 | 10 | 0,18 | <0,05 |
| | 0,18 | 8 | 6,9 | 1,1 | 12,3 | 210 | 8,9 | 7,4 | 40 | 50 | 15,3 | 7 | 0,22 | <0,05 |
| | 0,21 | 7,4 | 6 | 1,4 | 14,4 | 199 | 11,8 | 9,7 | 55 | 111 | 19,4 | 10 | 0,15 | <0,05 |
| | 0,18 | 7,3 | 6,4 | 0,9 | 14,2 | 206 | 8,9 | 7,8 | 39 | 45 | 14,2 | 8 | 0,16 | <0,05 |
| Mittelwert | 0,20 | 7,48 | 6,64 | 0,84 | 13,3 | 204,9 | 9,61 | 7,90 | 42,00 | 63,60 | 15,40 | 8,06 | 0,17 | <0,05 |
| Standardabweichung | 0,02 | 0,54 | 0,52 | 0,41 | 1,53 | 8,16 | 1,38 | 1,26 | 6,66 | 25,86 | 2,40 | 1,69 | 0,03 | 0,03 |
| obere Grenze | 0,22 | 8,15 | 7,28 | 1,35 | 15,16 | 215,07 | 11,32 | 9,46 | 50,27 | 95,71 | 18,37 | 10,16 | 0,21 | 0,07 |
| untere Grenze | 0,17 | 6,81 | 6,00 | 0,33 | 11,36 | 194,80 | 7,89 | 6,34 | 33,73 | 31,49 | 12,43 | 5,96 | 0,13 | 0,05 |
| optimale Probenanzahl | 4 | 2 | 2 | 93 | 5 | 1 | 8 | 10 | 10 | 63 | 9 | 17 | 13 | 4 |
| Fraktion 1 | 0,23 | 6,3 | 5,4 | 0,9 | 16,4 | 185 | 12,1 | 9,4 | 57 | 126 | 18,3 | 13 | 0,19 | <0,05 |
| Korngröße 16/32 | 0,22 | 6,3 | 5,3 | 1 | 16,9 | 186 | 11,2 | 9,8 | 45 | 64 | 16,6 | 18 | 0,18 | 0,185 |
| | 0,31 | 5,9 | 5 | 0,9 | 16,4 | 194 | 12,8 | 9,5 | 100 | 242 | 17,2 | 12 | 0,14 | <0,05 |
| | 0,2 | 6,1 | 5,6 | 0,5 | 15,4 | 187 | 12,2 | 8,6 | 66 | 94 | 18 | 10 | 0,19 | <0,05 |
| | 0,24 | 7,4 | 6,8 | 0,6 | 13 | 220 | 11,4 | 8,0 | 35 | 27 | 16,1 | 8 | 0,28 | <0,05 |
| Mittelwert | 0,24 | 6,4 | 5,62 | 0,78 | 15,6 | 194,524 | 11,966 | 9,0626 | 60,6 | 110,6 | 17,24 | 12,06 | 0,196 | <0,05 |
| Standardabweichung | 0,04 | 0,52 | 0,62 | 0,19 | 1,40 | 13,19 | 0,58 | 0,67 | 22,33 | 73,40 | 0,83 | 3,57 | 0,05 | 0,05 |
| obere Grenze | 0,29 | 7,05 | 6,39 | 1,02 | 17,36 | 210,91 | 12,68 | 9,90 | 88,33 | 201,74 | 18,27 | 16,49 | 0,25 | 0,07 |
| untere Grenze | 0,19 | 5,75 | 4,85 | 0,54 | 13,88 | 178,14 | 11,25 | 8,23 | 32,87 | 19,46 | 16,21 | 7,63 | 0,14 | 0,05 |
| optimale Probenanzahl | 9 | 3 | 5 | 24 | 3 | 2 | 1 | 2 | 52 | 169 | 1 | 34 | 21 | 4 |

Tab. 12-2a: Vorversuch vorsortierter Bauschutt: Stoffkonzentrationen bezogen auf Trockensubstanz

| | S | TC | TIC | TOC | Si | Ca | Al | Fe | Zn | Pb | Cr | Cu | Cd | Hg |
|------------------------------|------|------|------|-------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] |
| Leichtgut | 0,4 | 21,9 | 2,7 | 19,2 | 9,8 | 122 | 10,2 | 8,2 | 80 | 61 | 57,1 | 15 | 0,22 | 0,125 |
| | 0,7 | 18,8 | 3,4 | 15,4 | 11,6 | 157 | 14,7 | 7,9 | 65 | 93 | 56,2 | 14 | 0,24 | 0,09 |
| | 0,65 | 26,1 | 2,9 | 23,2 | 12,1 | 148 | 14,8 | 8,3 | 62 | 49 | 46,8 | 12 | 0,24 | 0,11 |
| | 0,57 | 23,3 | 3,2 | 20,1 | 12,7 | 144 | 12,5 | 8,1 | 125 | 35 | 50 | 18 | 0,24 | 0,095 |
| | 0,65 | 16,8 | 3 | 13,8 | 11,1 | 127,4 | 11,0 | 8,1 | 89,0 | 43,0 | 60,2 | 17,2 | 0,35 | 0,26 |
| Mittelwert | 0,59 | 21,4 | 3,04 | 18,34 | 11,46 | 139,70 | 12,65 | 8,13 | 84,20 | 56,20 | 54,06 | 15,18 | 0,258 | 0,136 |
| Standardabweichung | 0,11 | 3,28 | 0,24 | 3,37 | 0,99 | 13,05 | 1,89 | 0,14 | 22,66 | 20,26 | 4,91 | 2,28 | 0,05 | 0,06 |
| obere Grenze | 0,73 | 25,5 | 3,34 | 22,52 | 12,68 | 155,90 | 15,00 | 8,31 | 112,33 | 81,36 | 60,16 | 18,01 | 0,32 | 0,21 |
| untere Grenze | 0,46 | 17,3 | 2,74 | 14,16 | 10,24 | 123,50 | 10,30 | 7,95 | 56,07 | 31,04 | 47,96 | 12,35 | 0,20 | 0,06 |
| optimale Probenanzahl | 12 | 9 | 2 | 13 | 3 | 3 | 9 | 1 | 28 | 50 | 3 | 9 | 13 | 83 |
| Abwassersediment | 0,2 | 8,4 | 7 | 1,4 | n.b. | 209 | 14,3 | 10,4 | 67 | 45 | 31,9 | 16,2 | 0,27 | 0,185 |
| | 0,27 | 8,8 | 6,7 | 2,1 | n.b. | 207 | 14,0 | 11,7 | 95 | 65 | 33,4 | 20,4 | 0,32 | 0,18 |
| | 0,25 | 7,9 | 6,1 | 1,8 | n.b. | 201 | 15,1 | 11,6 | 81 | 49 | 35,7 | 17,7 | 0,29 | 0,13 |
| | 0,26 | 9 | 6,5 | 2,5 | n.b. | 195 | 11,8 | 12,2 | 136 | 79 | 30,4 | 25,6 | 0,35 | 0,345 |
| | 0,28 | 8,1 | 5,6 | 2,5 | n.b. | 182 | 14,0 | 15,0 | 161 | 95 | 35,4 | 30,9 | 0,35 | 0,46 |
| Mittelwert | 0,25 | 8,4 | 6,4 | 2,06 | - | 198,8 | 13,8 | 12,2 | 108 | 66,6 | 33,36 | 22,16 | 0,316 | 0,26 |
| Standardabweichung | 0,03 | 0,41 | 0,49 | 0,42 | - | 9,62 | 1,11 | 1,55 | 35,13 | 18,65 | 2,03 | 5,42 | 0,03 | 0,12 |
| obere Grenze | 0,29 | 8,95 | 6,99 | 2,58 | - | 210,72 | 15,22 | 14,09 | 151,62 | 89,76 | 35,88 | 28,89 | 0,36 | 0,41 |
| untere Grenze | 0,22 | 7,93 | 5,77 | 1,54 | - | 186,84 | 12,45 | 10,25 | 64,38 | 43,44 | 30,84 | 15,43 | 0,28 | 0,11 |
| optimale Probenanzahl | 5 | 1 | 2 | 16 | - | 1 | 2 | 6 | 41 | 30 | 1 | 23 | 4 | 87 |

Tab. 12-3: Vorversuch Vorsortierter Bauschutt: Stoffflüsse

| | S | TC | TIC | TOC | Si | Ca | Al | Fe | Zn | Pb | Cr | Cu | Cd | Hg |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [g/h] | [g/h] |
| Fraktion 3 (KG 0/4) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 36 | 2.050 | 1.881 | 169 | 2.988 | 5.186 | 163 | 171 | 1,1 | 1,4 | 0,31 | 0,27 | 3,57 | 1,5 |
| obere Grenze | 44 | 2.239 | 2.052 | 281 | 3.375 | 5.331 | 181 | 189 | 1,4 | 1,9 | 0,34 | 0,30 | 3,89 | 1,7 |
| untere Grenze | 28 | 1.860 | 1.710 | 56 | 2.600 | 5.040 | 144 | 152 | 0,8 | 0,9 | 0,28 | 0,24 | 3,47 | 1,4 |
| Fraktion 2 (KG 4/16) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 52 | 1.975 | 1.753 | 222 | 3.501 | 5.411 | 254 | 209 | 1,1 | 1,7 | 0,41 | 0,21 | 4,44 | <1,3 |
| obere Grenze | 59 | 2.153 | 1.922 | 357 | 4.003 | 5.679 | 299 | 250 | 1,3 | 2,5 | 0,49 | 0,27 | 5,44 | |
| untere Grenze | 45 | 1.797 | 1.584 | 86 | 2.999 | 5.144 | 208 | 168 | 0,9 | 0,8 | 0,33 | 0,16 | 3,43 | |
| Fraktion 1 (KG 16/32) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 37 | 986 | 866 | 120 | 2.407 | 2.998 | 184 | 140 | 0,9 | 1,7 | 0,27 | 0,19 | 3,02 | <1,2 |
| obere Grenze | 44 | 1.086 | 985 | 157 | 2.675 | 3.250 | 195 | 153 | 1,4 | 3,1 | 0,28 | 0,25 | 3,90 | |
| untere Grenze | 30 | 886 | 747 | 83 | 2.140 | 2.745 | 173 | 127 | 0,5 | 0,3 | 0,25 | 0,12 | 2,14 | |
| Eisenschrott | | | | | | | | 150 | | | | | | |
| Leichtgut | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 5 | 167 | 24 | 143 | 90 | 109 | 10 | 6,4 | 0,07 | 0,04 | 0,042 | 0,012 | 0,20 | 0,11 |
| obere Grenze | 6 | 199 | 26 | 176 | 99 | 122 | 12 | 6,5 | 0,09 | 0,06 | 0,047 | 0,014 | 0,25 | 0,17 |
| untere Grenze | 4 | 135 | 21 | 111 | 80 | 96 | 8 | 6,2 | 0,04 | 0,02 | 0,037 | 0,010 | 0,16 | 0,04 |
| Abwassersediment | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 18 | 608 | 459 | 148 | n.b. | 1.431 | 100 | 88 | 0,8 | 0,5 | 0,24 | 0,16 | 2,3 | 1,9 |
| obere Grenze | 21 | 645 | 503 | 186 | n.b. | 1.517 | 110 | 101 | 1,1 | 0,6 | 0,26 | 0,21 | 2,6 | 3,0 |
| untere Grenze | 16 | 571 | 416 | 111 | n.b. | 1.345 | 90 | 74 | 0,5 | 0,3 | 0,22 | 0,11 | 2,0 | 0,8 |
| Abwasser | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 21,8 | n.b. | n.b. | 1,6 | n.b. | 40 | 0,2 | 0,02 | n.n. | n.n. | 0,02 | 0,006 | n.n. | n.n. |
| obere Grenze | 32,8 | n.b. | n.b. | 2,6 | n.b. | 60 | 0,3 | 0,03 | n.n. | n.n. | 0,02 | 0,010 | n.n. | n.n. |
| untere Grenze | 10,8 | n.b. | n.b. | 0,6 | n.b. | 21 | 0,1 | 0,01 | n.n. | n.n. | 0,02 | 0,002 | n.n. | n.n. |
| Summe: | | | | | | | | | | | | | | |
| sortierter Bauschutt | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 169 | 5.788 | 4.983 | 804 | 8.986 | 15.175 | 710 | 763 | 4,0 | 5,3 | 1,3 | 0,8 | 13,5 | 3,5 |
| obere Grenze | 205 | 6.325 | 5.489 | 1.160 | 10.152 | 15.959 | 797 | 850 | 5,2 | 8,2 | 1,4 | 1,1 | 16,0 | |
| untere Grenze | 133 | 5.251 | 4.478 | 447 | 7.819 | 14.391 | 624 | 676 | 2,7 | 2,4 | 1,1 | 0,6 | 11,2 | |

Tab. 12-4: Vorversuch Vorsortierter Bauschutt: Transferkoeffizienten

| | S [kg/h] | TC [kg/h] | TIC [kg/h] | TOC [kg/h] | Si [kg/h] | Ca [kg/h] | Al [kg/h] | Fe [kg/h] | Zn [kg/h] | Pb [kg/h] | Cr [kg/h] | Cu [kg/h] | Cd [g/h] |
|------------------------------|-------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| Fraktion 3 (KG 0/4) | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,2114 | 0,3541 | 0,3774 | 0,2099 | 0,3325 | 0,3417 | 0,2288 | 0,2782 | 0,2736 | 0,2624 | 0,2415 | 0,3195 | 0,2646 |
| obere Grenze | 0,3292 | 0,4265 | 0,4583 | 0,6288 | 0,4317 | 0,3705 | 0,2896 | 0,3603 | 0,5037 | 0,7797 | 0,2982 | 0,4780 | 0,3474 |
| untere Grenze | 0,1353 | 0,2941 | 0,3115 | 0,0484 | 0,2561 | 0,3158 | 0,1812 | 0,2166 | 0,1543 | 0,1119 | 0,1967 | 0,2244 | 0,2163 |
| Fraktion 2 (KG 4/16) | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,3062 | 0,3412 | 0,3518 | 0,2759 | 0,3896 | 0,3566 | 0,3571 | 0,3405 | 0,2791 | 0,3170 | 0,3166 | 0,2514 | 0,3284 |
| obere Grenze | 0,4410 | 0,4100 | 0,4293 | 0,7981 | 0,5120 | 0,3946 | 0,4789 | 0,4750 | 0,4895 | 1,0588 | 0,4274 | 0,4223 | 0,4861 |
| untere Grenze | 0,2191 | 0,2842 | 0,2886 | 0,0745 | 0,2954 | 0,3223 | 0,2617 | 0,2394 | 0,1701 | 0,1013 | 0,2289 | 0,1488 | 0,2141 |
| Fraktion 1 (KG 16/32) | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,2188 | 0,1704 | 0,1738 | 0,1495 | 0,2679 | 0,1975 | 0,2596 | 0,2279 | 0,2351 | 0,3218 | 0,2069 | 0,2195 | 0,2236 |
| obere Grenze | 0,3328 | 0,2068 | 0,2199 | 0,3516 | 0,3421 | 0,2259 | 0,3132 | 0,2900 | 0,5019 | 1,3026 | 0,2479 | 0,4003 | 0,3484 |
| untere Grenze | 0,1452 | 0,1402 | 0,1361 | 0,0716 | 0,2108 | 0,1720 | 0,2177 | 0,1812 | 0,0968 | 0,0365 | 0,1743 | 0,1111 | 0,1337 |
| Leichtgut | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,0274 | 0,0289 | 0,0048 | 0,1782 | 0,0100 | 0,0072 | 0,0139 | 0,0104 | 0,0166 | 0,0083 | 0,0329 | 0,0140 | 0,0149 |
| obere Grenze | 0,0427 | 0,0379 | 0,0058 | 0,3932 | 0,0127 | 0,0085 | 0,0188 | 0,0123 | 0,0324 | 0,0266 | 0,0414 | 0,0222 | 0,0221 |
| untere Grenze | 0,0176 | 0,0214 | 0,0039 | 0,0953 | 0,0079 | 0,0060 | 0,0101 | 0,0089 | 0,0084 | 0,0030 | 0,0261 | 0,0091 | 0,0097 |
| Abwassersediment | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,1073 | 0,1050 | 0,0922 | 0,1845 | n.b. | 0,0943 | 0,1403 | 0,1430 | 0,1957 | 0,0905 | 0,1870 | 0,1885 | 0,1685 |
| obere Grenze | 0,1556 | 0,1228 | 0,1123 | 0,4159 | n.b. | 0,1054 | 0,1756 | 0,1929 | 0,4025 | 0,2708 | 0,2275 | 0,3276 | 0,2289 |
| untere Grenze | 0,0762 | 0,0902 | 0,0758 | 0,0953 | n.b. | 0,0843 | 0,1126 | 0,1054 | 0,0886 | 0,0381 | 0,1549 | 0,1050 | 0,1241 |
| Abwasser | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,1288 | n.b. | n.b. | 0,0020 | n.b. | 0,0027 | 0,0003 | n.n. | n.n. | n.n. | 0,0151 | 0,0072 | n.n. |
| obere Grenze | 0,2472 | n.b. | n.b. | 0,0057 | n.b. | 0,0042 | 0,0004 | n.n. | n.n. | n.n. | 0,0201 | 0,0165 | n.n. |
| untere Grenze | 0,0524 | n.b. | n.b. | 0,0005 | n.b. | 0,0013 | 0,0002 | n.n. | n.n. | n.n. | 0,0111 | 0,0016 | n.n. |
| Eisenschrott | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | | | | | | | | 0,1966 | | | | | |
| obere Grenze | | | | | | | | 0,2219 | | | | | |
| untere Grenze | | | | | | | | 0,1765 | | | | | |

Tab. 12-5: Hauptversuch 1 Vorsortierter Bauschutt: Stoffkonzentrationen im Abwasser

| | TOC [mg/l] | Chlorid [mg/l] | Sulfat [mg/l] | Ca [mg/l] | Al [µg/l] | Cd [µg/l] | Cr [µg/l] | Cu [µg/l] | Fe [µg/l] | Zn [µg/l] | Pb [µg/l] | Hg [µg/l] |
|--------------------|---------------|-------------------|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Abwasser 1 | 3,6 | 4,7 | 174,0 | 52,5 | 75,0 | <0,05 | 7,0 | <2,5 | <5 | <1 | <1 | <0,1 |
| Abwasser 2 | 18,4 | 146,0 | 653,0 | 218,6 | 70,1 | <0,05 | 29,7 | 19,4 | 12,7 | <1 | <1 | <0,1 |
| Abwasser 3 | 25,2 | 102,0 | 592,0 | 174,2 | 84,6 | <0,05 | 16,0 | 12,8 | 18,3 | 1,4 | <1 | <0,1 |
| Abwasser 4 | 5,1 | 20,0 | 160,0 | 45,5 | 131,8 | <0,05 | 8,4 | 4,3 | 12,7 | <1 | <1 | <0,1 |
| Abwasser 5 | 3,1 | 9,5 | 93,1 | 32,1 | 115,6 | <0,05 | 4,9 | <2,5 | 12,4 | <1 | <1 | <0,1 |
| Mittelwert | 11,1 | 56,4 | 334,4 | 104,6 | 95,4 | <0,05 | 13,2 | 12,2 | 14,0 | <1 | <1 | <0,1 |
| Standardabweichung | 9,0 | 57,1 | 237,6 | 76,6 | 24,1 | | 9,1 | 6,2 | 2,5 | | | |
| obere Grenze | 22,3 | 127,3 | 629,4 | 199,6 | 125,3 | | 24,4 | 19,9 | 17,1 | | | |
| untere Grenze | -0,1 | -14,5 | 39,4 | 9,5 | 65,5 | | 2,0 | 4,5 | 11,0 | | | |

Tab. 12-6: Hauptversuch 1 Vorsortierter Bauschutt: Stoffkonzentrationen bezogen auf Trockensubstanz

| | S | TC | TIC | TOC | Si | Ca | Al | Fe | Zn | Pb | Cr | Cu | Cd | Hg |
|-----------------------|------|------|------|-------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] |
| Fraktion 3 | 0,24 | 8,7 | 8,4 | 0,3 | 12,2 | 208 | 4,4 | 5,3 | 17,3 | 15,3 | 10,4 | <5 | 0,18 | 0,05 |
| Korngröße 0/4 | 0,16 | 7,5 | 6,4 | 1,1 | 14,9 | 187 | 5,6 | 6,7 | 26,6 | 18,2 | 13,5 | 7,7 | 0,17 | 0,07 |
| | 0,22 | 8,1 | 6,7 | 1,4 | 14,5 | 195 | 9,1 | 8,2 | 48,3 | 23,2 | 35,1 | 13,8 | 0,16 | 0,15 |
| | 0,17 | 7,3 | 3,7 | 3,6 | 15,2 | 190 | 9,4 | 9,1 | 40,8 | 22,1 | 18,5 | 15,5 | 0,19 | 0,11 |
| | 0,17 | 7,5 | 6,9 | 0,6 | 14,6 | 199 | 9,5 | 8,6 | 37,9 | 27,2 | 16,1 | 12,8 | 0,19 | 0,07 |
| Mittelwert | 0,2 | 7,8 | 6,4 | 1,4 | 14,3 | 195,8 | 7,6 | 7,6 | 34,2 | 21,2 | 18,7 | 12,5 | 0,2 | 0,09 |
| Standardabweichung | 0,03 | 0,52 | 1,52 | 1,16 | 1,07 | 7,46 | 2,18 | 1,38 | 10,96 | 4,10 | 8,62 | 2,88 | 0,01 | 0,04 |
| obere Grenze | 0,23 | 8,46 | 8,31 | 2,85 | 15,61 | 205,08 | 10,31 | 9,29 | 47,80 | 26,28 | 29,42 | 16,03 | 0,19 | 0,13 |
| untere Grenze | 0,15 | 7,18 | 4,53 | -0,05 | 12,95 | 186,55 | 4,89 | 5,87 | 20,58 | 16,10 | 8,01 | 8,88 | 0,16 | 0,05 |
| optimale Probenanzahl | 11 | 2 | 22 | 266 | 2 | 1 | 32 | 13 | 39 | 14 | 82 | 20 | 2 | 61 |
| Fraktion 2 | 0,29 | 7,6 | 7,3 | 0,3 | 13,2 | 216 | 6,3 | 6,3 | 26,4 | 26,5 | 19,2 | 5,0 | 0,16 | 0,03 |
| Korngröße 4/16 | 0,16 | 7,2 | 5,3 | 1,9 | 14,4 | 194 | 8,2 | 7,4 | 21,8 | 46,8 | 32,5 | 6,2 | 0,18 | 0,05 |
| | 0,19 | 7,2 | 6,2 | 1 | 14 | 216 | 9,7 | 8,6 | 23,3 | 28,0 | 27,1 | 11,3 | 0,13 | 0,04 |
| | 0,19 | 7,5 | 6,1 | 1,4 | 14,1 | 202 | 9,7 | 8,2 | 32,2 | 27,4 | 17,6 | 13,8 | 0,15 | 0,04 |
| | 0,16 | 7,6 | 7,3 | 0,3 | 13,3 | 205 | 9,0 | 8,3 | 39,5 | 51,6 | 16,4 | 16,2 | 0,21 | 0,04 |
| Mittelwert | 0,2 | 7,4 | 6,4 | 0,98 | 13,8 | 206,6 | 8,6 | 7,8 | 28,7 | 36,1 | 22,6 | 10,5 | 0,2 | 0,04 |
| Standardabweichung | 0,05 | 0,18 | 0,77 | 0,62 | 0,47 | 8,46 | 1,27 | 0,83 | 6,50 | 10,86 | 6,22 | 4,31 | 0,03 | 0,01 |
| obere Grenze | 0,26 | 7,65 | 7,39 | 1,76 | 14,38 | 217,11 | 10,16 | 8,79 | 36,74 | 49,56 | 30,28 | 15,85 | 0,20 | 0,05 |
| untere Grenze | 0,14 | 7,19 | 5,49 | 0,20 | 13,22 | 196,09 | 7,00 | 6,73 | 20,58 | 22,59 | 14,83 | 5,16 | 0,13 | 0,03 |
| optimale Probenanzahl | 22 | 1 | 5 | 156 | 1 | 1 | 8 | 4 | 20 | 35 | 29 | 65 | 10 | 10 |
| Fraktion 1 | 0,18 | 8 | 6,3 | 1,7 | 12 | 209 | 6,4 | 6,2 | 15,6 | <8 | 14,3 | 7,1 | 0,16 | 0,05 |
| Korngröße 16/32 | 0,18 | 6,8 | 6,4 | 0,4 | 13,8 | 197 | 7,3 | 6,7 | 16,0 | 70,0 | 17,9 | 7,2 | 0,15 | 0,03 |
| | 0,25 | 6,5 | 6,5 | 0 | 15,4 | 211 | 11,4 | 9,5 | 45,1 | 33,7 | 22,1 | 13,1 | 0,14 | 0,05 |
| | 0,14 | 6,3 | 5,6 | 0,7 | 15,8 | 198 | 9,9 | 7,6 | 25,3 | 61,9 | 18,3 | 8,8 | 0,13 | 0,02 |
| | 0,22 | 6,5 | 6,2 | 0,3 | 14,8 | 220 | 11,4 | 8,9 | 36,5 | 82,2 | 21,7 | 13,5 | 0,14 | 0,03 |
| Mittelwert | 0,19 | 6,82 | 6,20 | 0,62 | 14,36 | 207,20 | 9,27 | 7,77 | 27,70 | 61,94 | 18,88 | 9,95 | 0,14 | 0,04 |
| Standardabweichung | 0,04 | 0,61 | 0,32 | 0,58 | 1,36 | 8,50 | 2,09 | 1,26 | 11,55 | 17,83 | 2,85 | 2,83 | 0,01 | 0,01 |
| obere Grenze | 0,24 | 7,58 | 6,59 | 1,35 | 16,05 | 217,76 | 11,86 | 9,34 | 42,04 | 84,08 | 22,41 | 13,47 | 0,16 | 0,05 |
| untere Grenze | 0,15 | 6,06 | 5,81 | -0,11 | 12,67 | 196,65 | 6,68 | 6,20 | 13,36 | 39,81 | 15,34 | 6,44 | 0,13 | 0,02 |
| optimale Probenanzahl | 15 | 3 | 1 | 341 | 3 | 1 | 19 | 10 | 67 | 32 | 9 | 31 | 2 | 43 |

Tab. 12-6a: Hauptversuch 1 Vorsortierter Bauschutt: Stoffkonzentrationen bezogen auf Trockensubstanz

| | S | TC | TIC | TOC | Si | Ca | Al | Fe | Zn | Pb | Cr | Cu | Cd | Hg |
|------------------------------|------|-------|------|-------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] |
| Leichtgut | 0,44 | 12,8 | 3,2 | 9,6 | 16 | 156 | 12,9 | 8,9 | 71,9 | 30,6 | 62,3 | 17,0 | 0,25 | 0,23 |
| | 0,47 | 12,2 | 3,2 | 9 | 16,8 | 157 | 14,9 | 9,7 | 61,5 | 27,1 | 66,8 | 16,9 | 0,29 | 0,2 |
| | n.a. | 14,9 | 2,1 | 12,8 | 16,2 | 141 | 13,4 | 8,1 | 96,9 | 30,4 | 70,4 | 13,8 | 1,2 | 0,2 |
| | 0,79 | 12,5 | 3 | 9,5 | 16,5 | 149 | 13,1 | 8,0 | 60,2 | 17,4 | 67,8 | 14,5 | 0,32 | 0,11 |
| | 0,66 | 14,1 | 2,8 | 11,3 | 14,6 | 143 | 12,3 | 7,5 | 76,3 | 21,6 | 63,5 | 13,8 | 0,84 | 0,22 |
| Mittelwert | 0,59 | 13,30 | 2,86 | 10,44 | 16,02 | 148,98 | 13,32 | 8,45 | 73,36 | 25,44 | 66,16 | 15,20 | 0,58 | 0,19 |
| Standardabweichung | 0,14 | 1,03 | 0,41 | 1,41 | 0,76 | 6,39 | 0,86 | 0,76 | 13,26 | 5,16 | 2,96 | 1,45 | 0,38 | 0,04 |
| obere Grenze | 0,77 | 14,58 | 3,37 | 12,19 | 16,96 | 156,92 | 14,39 | 9,39 | 89,82 | 31,85 | 69,84 | 16,99 | 1,05 | 0,24 |
| untere Grenze | 0,41 | 12,02 | 2,35 | 8,69 | 15,08 | 141,05 | 12,25 | 7,51 | 56,89 | 19,04 | 62,48 | 13,40 | 0,11 | 0,14 |
| optimale Probenanzahl | 23 | 2 | 8 | 7 | 1 | 1 | 2 | 3 | 13 | 16 | 1 | 3 | 163 | 19 |
| Abwassersediment | 0,21 | 7,8 | 6,6 | 1,2 | n.b. | 191 | 12,7 | 9,7 | 97,4 | 59,8 | 26,6 | 30,1 | 0,77 | 0,21 |
| | 0,28 | 8,5 | 5,7 | 2,8 | n.b. | 187 | 22,2 | 13,6 | 157,9 | 94,9 | 47,5 | 42,3 | 0,58 | 0,97 |
| | 0,26 | 7,4 | 5,5 | 1,9 | n.b. | 188 | 25,2 | 13,8 | 136,4 | 93,0 | 36,6 | 44,1 | 0,62 | 0,72 |
| | 0,2 | 7,4 | 5,5 | 1,9 | n.b. | 196 | 20,9 | 13,5 | 132,5 | 87,4 | 35,9 | 44,2 | 0,53 | 0,59 |
| | 0,18 | 7,2 | 5,5 | 1,7 | n.b. | 195 | 20,8 | 13,2 | 134,5 | 90,0 | 34,4 | 41,0 | 0,59 | 0,52 |
| Mittelwert | 0,23 | 7,66 | 5,76 | 1,9 | - | 191,28 | 20,36 | 12,76 | 131,75 | 85,01 | 36,22 | 40,34 | 0,62 | 0,60 |
| Standardabweichung | 0,04 | 0,46 | 0,43 | 0,52 | - | 3,48 | 4,15 | 1,57 | 19,47 | 12,89 | 6,66 | 5,27 | 0,08 | 0,25 |
| obere Grenze | 0,27 | 8,23 | 6,29 | 2,54 | - | 195,60 | 25,51 | 14,71 | 155,92 | 101,01 | 44,49 | 46,88 | 0,72 | 0,91 |
| untere Grenze | 0,18 | 7,09 | 5,23 | 1,26 | - | 186,96 | 15,20 | 10,82 | 107,58 | 69,01 | 27,95 | 33,79 | 0,52 | 0,29 |
| optimale Probenanzahl | 11 | 1 | 2 | 29 | - | 1 | 16 | 6 | 8 | 9 | 13 | 7 | 7 | 66 |

Tab. 12-7: Hauptversuch 1 Vorsortierter Bauschutt: Stoffflüsse

| | S | TC | TIC | TOC | Si | Ca | Al | Fe | Zn | Pb | Cr | Cu | Cd | Hg |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [g/h] | [g/h] |
| Fraktion 3 (KG 0/4) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 32 | 1.285 | 1.055 | 230 | 2.346 | 3.217 | 125 | 125 | 0,6 | 0,3 | 0,31 | 0,20 | 2,92 | 1,48 |
| obere Grenze | 38 | 1.390 | 1.366 | 468 | 2.564 | 3.369 | 169 | 153 | 0,8 | 0,4 | 0,48 | 0,26 | 3,16 | 2,21 |
| untere Grenze | 25 | 1.180 | 744 | -8 | 2.128 | 3.065 | 80 | 96 | 0,3 | 0,3 | 0,13 | 0,15 | 3,05 | 0,85 |
| Fraktion 2 (KG 4/16) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 37 | 1.384 | 1.201 | 183 | 2.574 | 3.853 | 160 | 145 | 0,5 | 0,7 | 0,42 | 0,20 | 3,10 | 0,75 |
| obere Grenze | 48 | 1.426 | 1.379 | 327 | 2.682 | 4.049 | 189 | 164 | 0,7 | 0,9 | 0,56 | 0,30 | 3,73 | 0,89 |
| untere Grenze | 26 | 1.341 | 1.023 | 38 | 2.465 | 3.657 | 131 | 126 | 0,4 | 0,4 | 0,28 | 0,10 | 2,46 | 0,60 |
| Fraktion 1 (KG 16/32) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 25 | 895 | 814 | 81 | 1.885 | 2.721 | 122 | 102 | 0,4 | 0,8 | 0,25 | 0,13 | 1,89 | 0,47 |
| obere Grenze | 32 | 995 | 866 | 177 | 2.107 | 2.859 | 156 | 123 | 0,6 | 1,1 | 0,29 | 0,18 | 2,06 | 0,67 |
| untere Grenze | 19 | 796 | 763 | -14 | 1.664 | 2.582 | 88 | 81 | 0,2 | 0,5 | 0,20 | 0,08 | 1,72 | 0,28 |
| Eisenschrott | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | 140 | | | | | |
| Leichtgut | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 4 | 88 | 19 | 69 | 106 | 98 | 8,8 | 5,6 | 0,048 | 0,017 | 0,044 | 0,010 | 0,38 | 0,13 |
| obere Grenze | 5 | 96 | 22 | 80 | 112 | 104 | 9,5 | 6,2 | 0,059 | 0,021 | 0,046 | 0,011 | 0,69 | 0,16 |
| untere Grenze | 3 | 79 | 16 | 57 | 100 | 93 | 8,1 | 5,0 | 0,038 | 0,013 | 0,041 | 0,009 | 0,07 | 0,09 |
| Abwassersediment | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 9 | 306 | 230 | 76 | n.b. | 765 | 81 | 51 | 0,5 | 0,3 | 0,1 | 0,2 | 2,5 | 2,4 |
| obere Grenze | 11 | 329 | 252 | 102 | n.b. | 782 | 102 | 59 | 0,6 | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 2,9 | 3,6 |
| untere Grenze | 7 | 283 | 209 | 50 | n.b. | 748 | 61 | 43 | 0,4 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 2,1 | 1,2 |
| Abwasser | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 19 | n.b. | n.b. | 1,6 | n.b. | 18 | 0,017 | 0,0024 | n.n. | n.n. | 0,0023 | 0,0021 | n.n. | n.n. |
| obere Grenze | 37 | n.b. | n.b. | 2,6 | n.b. | 35 | 0,022 | 0,0030 | n.n. | n.n. | 0,0043 | 0,0035 | n.n. | n.n. |
| untere Grenze | 2 | n.b. | n.b. | 0,6 | n.b. | 1,7 | 0,011 | 0,0019 | n.n. | n.n. | 0,0003 | 0,0008 | n.n. | n.n. |
| Summe: | | | | | | | | | | | | | | |
| sortierter Bauschutt | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 126 | 3.960 | 3.319 | 641 | 6.911 | 10.673 | 497 | 568 | 2,0 | 2,2 | 1,2 | 0,7 | 10,8 | 5,2 |
| obere Grenze | 170 | 4.241 | 3.884 | 1.156 | 7.465 | 11.198 | 626 | 644 | 2,7 | 2,9 | 1,6 | 0,9 | 12,5 | 7,6 |
| untere Grenze | 82 | 3.680 | 2.754 | 125 | 6.357 | 10.147 | 368 | 491 | 1,4 | 1,5 | 0,8 | 0,5 | 9,4 | 3,0 |

Tab. 12-8: Hauptversuch 1 Vorsortierter Bauschutt: Transferkoeffizienten

| | S | TC | TIC | TOC | Si | Ca | Al | Fe | Zn | Pb | Cr | Cu | Cd | Hg |
|------------------------------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [g/h] | [g/h] |
| Fraktion 3 (KG 0/4) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,2497 | 0,3244 | 0,3178 | 0,3590 | 0,3395 | 0,3014 | 0,2513 | 0,2193 | 0,2760 | 0,1589 | 0,2635 | 0,2904 | 0,2716 | 0,2826 |
| obere Grenze | 0,4619 | 0,3777 | 0,4960 | 3,7390 | 0,4034 | 0,3321 | 0,4607 | 1,0901 | 0,5752 | 0,2884 | 0,6335 | 0,5584 | 0,3372 | 0,7387 |
| untere Grenze | 0,1471 | 0,2782 | 0,1915 | -0,0065 | 0,2851 | 0,2737 | 0,1284 | 0,1497 | 0,1250 | 0,0917 | 0,0838 | 0,1556 | 0,2437 | 0,1122 |
| Fraktion 2 (KG 4/16) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,2923 | 0,3494 | 0,3619 | 0,2853 | 0,3724 | 0,3610 | 0,3220 | 0,2549 | 0,2626 | 0,3071 | 0,3605 | 0,2780 | 0,2876 | 0,1426 |
| obere Grenze | 0,5830 | 0,3876 | 0,5007 | 2,6174 | 0,4220 | 0,3991 | 0,5153 | 1,1711 | 0,5018 | 0,6174 | 0,7402 | 0,6270 | 0,3974 | 0,2985 |
| untere Grenze | 0,1517 | 0,3163 | 0,2634 | 0,0331 | 0,3302 | 0,3266 | 0,2086 | 0,1948 | 0,1419 | 0,1460 | 0,1761 | 0,1026 | 0,1969 | 0,0791 |
| Fraktion 1 (KG 16/32) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,2016 | 0,2261 | 0,2453 | 0,1271 | 0,2728 | 0,2549 | 0,2450 | 0,1796 | 0,1787 | 0,3712 | 0,2124 | 0,1854 | 0,1756 | 0,0903 |
| obere Grenze | 0,3839 | 0,2704 | 0,3143 | 1,4129 | 0,3315 | 0,2818 | 0,4237 | 0,8755 | 0,4043 | 0,7374 | 0,3856 | 0,3750 | 0,2193 | 0,2235 |
| untere Grenze | 0,1135 | 0,1877 | 0,1963 | -0,0120 | 0,2229 | 0,2306 | 0,1401 | 0,1263 | 0,0648 | 0,1812 | 0,1283 | 0,0901 | 0,1378 | 0,0366 |
| Leichtgut | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,0308 | 0,0222 | 0,0057 | 0,1075 | 0,0153 | 0,0092 | 0,0177 | 0,0098 | 0,0238 | 0,0077 | 0,0374 | 0,0142 | 0,0356 | 0,0242 |
| obere Grenze | 0,0615 | 0,0261 | 0,0081 | 0,6435 | 0,0176 | 0,0102 | 0,0258 | 0,0443 | 0,0434 | 0,0140 | 0,0604 | 0,0238 | 0,0738 | 0,0541 |
| untere Grenze | 0,0160 | 0,0187 | 0,0040 | 0,0496 | 0,0133 | 0,0083 | 0,0129 | 0,0077 | 0,0139 | 0,0044 | 0,0263 | 0,0094 | 0,0059 | 0,0121 |
| Abwassersediment | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,0716 | 0,0774 | 0,0694 | 0,1186 | 0,0000 | 0,0717 | 0,1639 | 0,0899 | 0,2589 | 0,1552 | 0,1242 | 0,2289 | 0,2296 | 0,4602 |
| obere Grenze | 0,1325 | 0,0895 | 0,0914 | 0,8133 | 0,0000 | 0,0771 | 0,2776 | 0,4203 | 0,4568 | 0,2699 | 0,2333 | 0,3977 | 0,3066 | 1,2189 |
| untere Grenze | 0,0421 | 0,0668 | 0,0539 | 0,0435 | 0,0000 | 0,0668 | 0,0971 | 0,0672 | 0,1591 | 0,0957 | 0,0712 | 0,1441 | 0,1652 | 0,1547 |
| Abwasser | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,1539 | n.b. | n.b. | 0,0025 | n.b. | 0,0017 | n.n. | n.n. | n.n. | n.n. | 0,0020 | 0,0030 | n.n. | n.n. |
| obere Grenze | 0,4443 | n.b. | n.b. | 0,0205 | n.b. | 0,0034 | n.n. | n.n. | n.n. | n.n. | 0,0056 | 0,0073 | n.n. | n.n. |
| untere Grenze | 0,0135 | n.b. | n.b. | 0,0005 | n.b. | 0,0001 | n.n. | n.n. | n.n. | n.n. | 0,0002 | 0,0008 | n.n. | n.n. |
| Eisenschrott | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | | | | | | | | 0,247 | | | | | | |
| obere Grenze | | | | | | | | 0,285 | | | | | | |
| untere Grenze | | | | | | | | 0,217 | | | | | | |

Tab. 12-9: Hauptversuch 1 Betonabbruch: Stoffkonzentrationen im Abwasser

| | TOC [mg C/l] | Chlorid [mg/l] | Sulfat [mg/l] | Ca [mg/l] | Al [µg/l] | Cd [µg/l] | Cr [µg/l] | Cu [µg/l] | Fe [µg/l] | Zn [µg/l] | Pb [µg/l] | Hg [µg/l] |
|--------------------|-----------------|-------------------|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Abwasser 1 | 6,6 | 3,92 | 32,8 | 79,6 | 688,4 | < 0,05 | 3,6 | 23,3 | <5 | <1 | < 1 | <0,1 |
| Abwasser 2 | 5,1 | 13,6 | 44,1 | 280,6 | 115,1 | < 0,05 | 9,8 | 7,9 | <5 | <1 | < 1 | 0,6 |
| Abwasser 3 | 5,9 | 2,72 | 103 | 212,1 | 110,6 | < 0,05 | 14,3 | 16,4 | 8,5 | 1,3 | < 1 | <0,1 |
| Abwasser 4 | 2 | 4,18 | 32,3 | 59,3 | 262,2 | < 0,05 | 5,0 | <2,5 | <5 | <1 | < 1 | <0,1 |
| Abwasser 5 | 4,2 | 3,83 | 43,1 | 47,4 | 723,0 | < 0,05 | 3,6 | 6,6 | 6,0 | <1 | < 1 | <0,1 |
| Mittelwert | 4,8 | 5,7 | 51,1 | 135,8 | 379,8 | <0,05 | 7,3 | 13,5 | 7,3 | <1 | | <0,1 |
| Standardabweichung | 1,6 | 4,0 | 26,4 | 93,4 | 271,8 | | 4,2 | 6,8 | 1,3 | | | |
| obere Grenze | 6,7 | 10,6 | 83,9 | 251,8 | 717,3 | | 12,5 | 22,0 | 8,9 | | | |
| untere Grenze | 2,8 | 0,7 | 18,2 | 19,8 | 42,3 | | 2,1 | 5,1 | 5,7 | | | |

Tab. 12-10: Hauptversuch 1 Betonabbruch: Stoffkonzentrationen bezogen auf Trockensubstanz

| | S | TC | TIC | TOC | Si | Ca | Al | Fe | Zn | Pb | Cr | Cu | Cd | Hg |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] |
| Fraktion 3 | | | | | | | | | | | | | | |
| Korngröße 0/4 | n.a. | 9,6 | 9,5 | 0,1 | 8 | 229 | 3,7 | 4,5 | 50,7 | 89,1 | 7,8 | 5,8 | 0,21 | 0,02 |
| | 0,12 | 10,3 | 6,2 | 4,1 | 5,9 | 220 | 3,6 | 3,7 | 15,5 | 11,2 | 7,4 | < 5 | 0,18 | 0,07 |
| | 0,13 | 10,3 | 9,3 | 1 | 6,2 | 234 | 3,7 | 3,9 | 11,0 | < 8 | 12,5 | < 5 | 0,2 | 0,05 |
| | 0,13 | 10 | 9,7 | 0,3 | 7,1 | 238 | 3,8 | 3,9 | 13,8 | 14,4 | 8,0 | < 5 | 0,21 | 0,04 |
| | n.a. | 9 | 8,3 | 0,7 | 9,4 | 229 | 4,8 | 4,6 | < 10 | < 8 | 9,1 | < 5 | 0,16 | 0,03 |
| Mittelwert | 0,13 | 9,8 | 8,6 | 1,2 | 7,3 | 230,0 | 3,9 | 4,1 | 22,7 | 38,2 | 9,0 | < 5 | 0,2 | 0,04 |
| Standardabweichung | 0,005 | 0,49 | 1,29 | 1,46 | 1,27 | 5,80 | 0,46 | 0,38 | 16,21 | 35,99 | 1,85 | | 0,02 | 0,02 |
| obere Grenze | 0,13 | 10,45 | 10,21 | 3,06 | 8,90 | 237,18 | 4,51 | 4,59 | 42,85 | 82,94 | 11,27 | | 0,22 | 0,06 |
| untere Grenze | 0,12 | 9,23 | 6,99 | -0,58 | 5,74 | 222,77 | 3,36 | 3,65 | 2,60 | -6,45 | 6,68 | | 0,17 | 0,02 |
| optimale Probenanzahl | 1 | 1 | 9 | 535 | 12 | 1 | 5 | 3 | 195 | 340 | 16 | | 4 | 64 |
| Fraktion 2 | | | | | | | | | | | | | | |
| Korngröße 4/16 | < 0,1 | 9,2 | 8,7 | 0,5 | 8,5 | 237 | 4,0 | 4,5 | 30,6 | 12,9 | 9,6 | 6,6 | 0,21 | 0,02 |
| | < 0,1 | 10,7 | 10,4 | 0,3 | 4,9 | 225 | 2,7 | 2,7 | < 10 | < 8 | 5,0 | < 5 | 0,17 | 0,06 |
| | 0,11 | 10,5 | 10,3 | 0,2 | 4,4 | 242 | 3,2 | 3,1 | < 10 | 12,2 | 10,0 | < 5 | 0,35 | 0,04 |
| | 0,1 | 9,8 | 9,3 | 0,5 | 7 | 245 | 3,5 | 4,1 | < 10 | < 8 | 9,6 | < 5 | 0,21 | 0,04 |
| | n.a. | 10 | 9,8 | 0,2 | 6,1 | 230 | 3,7 | 3,8 | 9,8 | < 8 | 7,1 | < 5 | 0,15 | 0,06 |
| Mittelwert | 0,1 | 10,0 | 9,7 | 0,34 | 6,2 | 235,9 | 3,4 | 3,6 | 20,2 | 12,5 | 8,2 | < 5 | 0,2 | 0,04 |
| Standardabweichung | 0,005 | 0,53 | 0,64 | 0,14 | 1,47 | 7,67 | 0,45 | 0,67 | 10,41 | 0,35 | 1,94 | | 0,07 | 0,01 |
| obere Grenze | 0,11 | 10,70 | 10,49 | 0,51 | 8,01 | 245,39 | 3,99 | 4,46 | 33,12 | 12,98 | 10,65 | | 0,30 | 0,06 |
| untere Grenze | 0,10 | 9,38 | 8,91 | 0,17 | 4,35 | 226,35 | 2,88 | 2,81 | 7,28 | 12,11 | 5,82 | | 0,13 | 0,03 |
| optimale Probenanzahl | 1 | 1 | 2 | 61 | 22 | 1 | 7 | 13 | 102 | 1 | 21 | | 40 | 44 |
| Fraktion 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| Korngröße 16/32 | 0,1 | 8,8 | 6,7 | 2,1 | 9,1 | 243 | 3,9 | 4,3 | 19,3 | < 8 | 9,7 | 5,9 | 0,17 | 0,01 |
| | < 0,1 | 10,3 | 7,4 | 2,9 | 5,7 | 222 | 3,1 | 2,8 | < 10 | < 8 | 8,1 | < 5 | 0,15 | 0,07 |
| | 0,14 | 9,9 | 7 | 2,9 | 6,8 | 240 | 4,2 | 3,9 | 14,9 | 44,4 | 8,0 | < 5 | 0,2 | 0,04 |
| | 0,18 | 9,5 | 8,9 | 0,6 | 7,2 | 249 | 4,5 | 4,6 | 10,0 | < 8 | 7,6 | < 5 | 0,2 | 0,05 |
| | < 0,1 | 9,6 | 8,7 | 0,9 | 7,5 | 230 | 4,9 | 5,2 | 15,0 | < 8 | 9,2 | < 5 | 0,19 | 0,05 |
| Mittelwert | 0,14 | 9,62 | 7,74 | 1,88 | 7,26 | 236,61 | 4,11 | 4,18 | 14,80 | < 8 | 8,53 | < 5 | 0,18 | 0,04 |
| Standardabweichung | 0,03 | 0,50 | 0,90 | 0,97 | 1,10 | 9,60 | 0,61 | 0,81 | 3,29 | | 0,79 | | 0,02 | 0,02 |
| obere Grenze | 0,18 | 10,24 | 8,85 | 3,09 | 8,63 | 248,52 | 4,87 | 5,19 | 18,89 | | 9,50 | | 0,21 | 0,07 |
| untere Grenze | 0,10 | 9,00 | 6,63 | 0,67 | 5,89 | 224,69 | 3,35 | 3,18 | 10,71 | | 7,55 | | 0,16 | 0,02 |
| optimale Probenanzahl | 21 | 1 | 5 | 103 | 9 | 1 | 9 | 14 | 19 | | 3 | | 4 | 76 |

Tab. 12-10a: Hauptversuch 1 Betonabbruch: Stoffkonzentrationen bezogen auf Trockensubstanz

| | S | TC | TIC | TOC | Si | Ca | Al | Fe | Zn | Pb | Cr | Cu | Cd | Hg |
|-----------------------|------|------|------|------|------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] |
| Leichtgut | n.b. | 38,9 | 1,5 | 37,4 | 5,6 | 54 | 3,9 | 3,7 | 95,6 | 90,7 | 53,2 | 13,1 | 5,22 | 0,22 |
| Abwassersediment | 0,24 | 7,4 | 6,3 | 1,1 | n.b. | 189 | 15,5 | 15,4 | 422,9 | 262,8 | 37,4 | 35,9 | 0,48 | 0,17 |
| | 0,3 | 8,6 | 7 | 1,6 | n.b. | 226 | 9,6 | 9,1 | 56,3 | 22,3 | 28,9 | 21,9 | 0,26 | 0,22 |
| | 0,38 | 8,7 | 7,3 | 1,4 | n.b. | 214 | 10,5 | 10,2 | 66,2 | 24,8 | 26,7 | 16,5 | 0,28 | 0,14 |
| | -- | -- | 7,9 | | n.b. | 228 | 10,9 | 9,0 | 50,6 | 33,3 | 26,1 | 20,5 | 0,28 | 0,14 |
| Mittelwert | 0,12 | 7,7 | 6,2 | 1,5 | n.b. | 177 | 21,7 | 18,8 | 557,5 | 324,7 | 45,0 | 59,0 | 1,09 | 0,23 |
| Standardabweichung | 0,26 | 8,10 | 6,94 | 1,4 | | 206,81 | 13,63 | 12,49 | 230,70 | 133,57 | 32,81 | 30,74 | 0,48 | 0,18 |
| Standardabweichung | 0,09 | 0,56 | 0,63 | 0,19 | | 20,21 | 4,51 | 3,93 | 216,17 | 132,29 | 7,32 | 15,54 | 0,32 | 0,04 |
| obere Grenze | 0,38 | 8,80 | 7,73 | 1,63 | | 231,90 | 19,23 | 17,37 | 499,12 | 297,82 | 41,90 | 50,04 | 0,87 | 0,23 |
| untere Grenze | 0,14 | 7,40 | 6,15 | 1,17 | | 181,72 | 8,03 | 7,61 | -37,71 | -30,69 | 23,73 | 11,44 | 0,09 | 0,13 |
| optimale Probenanzahl | 51 | 2 | 3 | 7 | | 4 | 42 | 38 | 337 | 377 | 19 | 98 | 168 | 18 |

Tab. 12-11: Hauptversuch 1 Betonabbruch: Stoffflüsse

| | S | TC | TIC | TOC | Si | Ca | Al | Fe | Zn | Pb | Cr | Cu | Cd | Hg |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [g/h] | [g/h] |
| Fraktion 3 (KG 0/4) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 12 | 933 | 815 | 118 | 694 | 2.180 | 37 | 39 | 0,2 | 0,4 | 0,085 | <0,05 | 1,8 | 0,4 |
| obere Grenze | 13 | 991 | 967 | 290 | 844 | 2.248 | 43 | 43 | 0,4 | 0,8 | 0,107 | | 2,0 | 0,6 |
| untere Grenze | 11 | 875 | 663 | -55 | 544 | 2.112 | 32 | 35 | 0,0 | -0,1 | 0,063 | | 2,2 | 0,3 |
| Fraktion 2 (KG 4/16) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 14 | 1.332 | 1.287 | 45 | 820 | 3.130 | 46 | 48 | <0,27 | <0,17 | 0,109 | <0,09 | 2,9 | 0,6 |
| obere Grenze | 15 | 1.420 | 1.392 | 67 | 1.063 | 3.256 | 53 | 59 | | | 0,141 | | 4,0 | 0,8 |
| untere Grenze | 13 | 1.245 | 1.182 | 23 | 577 | 3.004 | 38 | 37 | | | 0,077 | | 1,7 | 0,3 |
| Fraktion 1 (KG 16/32) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 10 | 703 | 566 | 137 | 531 | 1.730 | 30 | 31 | 0,11 | <0,3 | 0,062 | <0,04 | 1,3 | 0,3 |
| obere Grenze | 13 | 748 | 647 | 226 | 631 | 1.817 | 36 | 38 | 0,14 | | 0,069 | | 1,5 | 0,5 |
| untere Grenze | 7 | 658 | 484 | 49 | 431 | 1.642 | 25 | 23 | 0,08 | | 0,055 | | 1,2 | 0,1 |
| Eisenschrott | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | 100 | | | | | | |
| Leichtgut | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | n.b. | 26 | 1 | 25 | 3,7 | 3,6 | 0,3 | 0,2 | 0,006 | 0,006 | 0,004 | 0,001 | 0,34 | 0,015 |
| obere Grenze | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. |
| untere Grenze | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. |
| Abwassersediment | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 6 | 184 | 158 | 32 | n.b. | 471 | 31 | 28 | 0,53 | 0,30 | 0,07 | 0,07 | 1,09 | 0,4 |
| obere Grenze | 9 | 200 | 176 | 37 | n.b. | 528 | 44 | 40 | 1,14 | 0,68 | 0,10 | 0,11 | 1,98 | 0,5 |
| untere Grenze | 3 | 168 | 140 | 27 | n.b. | 414 | 18 | 17 | -0,09 | -0,07 | 0,05 | 0,03 | 0,19 | 0,3 |
| Abwasser | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 3,0 | n.b. | n.b. | 1,6 | n.b. | 24,1 | 0,067 | 0,00129 | n.n. | n.n. | 0,0013 | 0,0024 | n.n. | n.n. |
| obere Grenze | 5,0 | n.b. | n.b. | 2,6 | n.b. | 44,7 | 0,127 | 0,00157 | n.n. | n.n. | 0,0022 | 0,0039 | n.n. | n.n. |
| untere Grenze | 1,1 | n.b. | n.b. | 0,6 | n.b. | 3,5 | 0,008 | 0,00102 | n.n. | n.n. | 0,0004 | 0,0009 | n.n. | n.n. |
| Summe: | | | | | | | | | | | | | | |
| Betonabbruch | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 45 | 3.179 | 2.827 | 358 | 2.048 | 7.538 | 144 | 247 | 1,1 | 1,2 | 0,26 | 0,07 | 7,5 | 1,7 |
| obere Grenze | 54 | 3.360 | 3.182 | 623 | 2.538 | 7.894 | 175 | 280 | 2,1 | 2,0 | 0,30 | 0,11 | 9,6 | 2,4 |
| untere Grenze | 36 | 2.947 | 2.470 | 44 | 1.552 | 7.175 | 113 | 212 | 0,1 | 0,4 | 0,21 | 0,03 | 5,3 | 1,1 |

Tab. 12-12: Hauptversuch 1 Betonabbruch: Transferkoeffizienten

| | S | TC | TIC | TOC | Si | Ca | Al | Fe | Zn | Pb | Cr | Cu | Cd | Hg |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [g/h] | [g/h] |
| Fraktion 3 (KG 0/4) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,2662 | 0,2934 | 0,2884 | 0,3281 | 0,3388 | 0,2892 | 0,2584 | 0,1363 | 0,1918 | 0,3115 | 0,2531 | 0,2115 | 0,2435 | 0,2304 |
| obere Grenze | 0,3475 | 0,3362 | 0,3917 | n.b. | 0,5438 | 0,3134 | 0,3788 | 0,3105 | n.b. | n.b. | 0,4272 | 0,2576 | 0,3853 | 0,5689 |
| untere Grenze | 0,2118 | 0,2604 | 0,2084 | n.b. | 0,2144 | 0,2675 | 0,1817 | 0,1081 | n.b. | n.b. | 0,1525 | 0,1804 | 0,2325 | 0,1118 |
| Fraktion 2 (KG 4/16) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,3089 | 0,4191 | 0,4553 | 0,1259 | 0,4003 | 0,4152 | 0,3158 | 0,1683 | 0,2387 | 0,1430 | 0,3251 | 0,3378 | 0,3870 | 0,3379 |
| obere Grenze | 0,4083 | 0,4818 | 0,5635 | n.b. | 0,6850 | 0,4538 | 0,4693 | 0,4231 | 3,8654 | 0,4857 | 0,5649 | 0,4114 | 0,7610 | 0,7865 |
| untere Grenze | 0,2424 | 0,3704 | 0,3716 | 0,0366 | 0,2274 | 0,3805 | 0,2179 | 0,1163 | 0,0456 | 0,0820 | 0,1861 | 0,2881 | 0,1816 | 0,1377 |
| Fraktion 1 (KG 16/32) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,2268 | 0,2212 | 0,2001 | 0,3836 | 0,2591 | 0,2294 | 0,2085 | 0,1067 | 0,0963 | 0,2791 | 0,1854 | 0,1674 | 0,1780 | 0,1861 |
| obere Grenze | 0,3651 | 0,2539 | 0,2620 | 5,0836 | 0,4066 | 0,2532 | 0,3159 | 0,2709 | 1,2145 | 0,9160 | 0,2777 | 0,2040 | 0,2833 | 0,4731 |
| untere Grenze | 0,1344 | 0,1959 | 0,1522 | 0,0790 | 0,1696 | 0,2081 | 0,1399 | 0,0725 | 0,0369 | 0,1656 | 0,1329 | 0,1428 | 0,1205 | 0,0587 |
| Leichtgut | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | n.b. | 0,0081 | 0,0004 | 0,0689 | 0,0018 | 0,0005 | 0,0018 | 0,0008 | 0,0056 | 0,0051 | 0,0104 | 0,0034 | 0,0461 | 0,0084 |
| obere Grenze | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. |
| untere Grenze | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. |
| Abwassersediment | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,1312 | 0,0580 | 0,0559 | 0,0889 | 0,0000 | 0,0624 | 0,2151 | 0,0992 | 0,4676 | 0,2612 | 0,2222 | 0,2707 | 0,1455 | 0,2371 |
| obere Grenze | 0,2379 | 0,0679 | 0,0712 | 0,8368 | 0,0000 | 0,0736 | 0,3881 | 0,2824 | n.b. | n.b. | 0,3813 | 0,5367 | 0,3728 | 0,4910 |
| untere Grenze | 0,0598 | 0,0501 | 0,0440 | 0,0427 | 0,0000 | 0,0524 | 0,1043 | 0,0541 | n.b. | n.b. | 0,1301 | 0,0859 | 0,0202 | 0,1229 |
| Abwasser | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,0670 | n.b. | n.b. | 0,0045 | n.b. | 0,0032 | 0,0005 | n.n. | n.n. | n.n. | 0,0038 | 0,0093 | n.n. | n.n. |
| obere Grenze | 0,1373 | n.b. | n.b. | 0,0577 | n.b. | 0,0062 | 0,0011 | n.n. | n.n. | n.n. | 0,0089 | 0,0184 | n.n. | n.n. |
| untere Grenze | 0,0199 | n.b. | n.b. | 0,0010 | n.b. | 0,0004 | 0,0000 | n.n. | n.n. | n.n. | 0,0009 | 0,0030 | n.n. | n.n. |
| Eisenschrott | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | | | | | | | | | | | | | | 0,405 |
| obere Grenze | | | | | | | | | | | | | | 0,472 |
| untere Grenze | | | | | | | | | | | | | | 0,357 |

Tab. 12-13: Hauptversuch 2 Vorsortierter Bauschutt: Stoffkonzentrationen im Abwasser

| | TOC [mg C/l] | Chlorid [mg/l] | Sulfat [mg/l] | Ca [mg/l] | Al [µg/l] | Cd [µg/l] | Cr [µg/l] | Cu [µg/l] | Fe [µg/l] | Zn [µg/l] | Pb [µg/l] | Hg [µg/l] |
|--------------------|-----------------|-------------------|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Abwasser 1 | 15,7 | 16,79 | 235,5 | 115,7 | 217,1 | <0,05 | 28 | 39,2 | <10 | <4 | <1,0 | 0,2 |
| Abwasser 2 | 21,6 | 17,51 | 274,1 | 115,7 | 146,5 | <0,05 | 34,4 | 31,1 | <10 | <4 | <1,0 | 0,108 |
| Abwasser 3 | 6,1 | 10,47 | 119,3 | 32,8 | 55,8 | <0,05 | 8,87 | <2,5 | <10 | <4 | <1,0 | <0,1 |
| Abwasser 4 | 11,4 | 11,38 | 176,7 | 56,4 | 68,8 | <0,05 | 16,6 | 3,0 | <10 | <4 | <1,0 | <0,1 |
| Abwasser 5 | 9,4 | 21,27 | 339,0 | 166,7 | 161,8 | <0,05 | 62,5 | 19,6 | <10 | <4 | <1,0 | <0,1 |
| Mittelwert | 12,8 | 15,48 | 228,9 | 156,6 | 130,0 | <0,05 | 30,1 | 23,2 | <10 | <4 | <1,0 | 0,1 |
| Standardabweichung | 5,4 | 4,0 | 76,1 | 92,7 | 60,2 | <0,05 | 18,5 | 13,6 | | | | |
| obere Grenze | 19,5 | 20,5 | 323,4 | 271,7 | 204,8 | | 53,0 | 40,1 | | | | |
| untere Grenze | 6,2 | 10,5 | 134,5 | 41,4 | 55,2 | | 7,1 | 6,4 | | | | |

Tab. 12-14: Hauptversuch 2 Vorsortierter Bauschutt: Stoffkonzentrationen bezogen auf Trockensubstanz

| | S | TC | TIC | TOC | Si | Ca | Al | Fe | Zn | Pb | Cr | Cu | Cd | Hg |
|-----------------------|-------|------|------|------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] |
| Fraktion 3 | 0,15 | 6,48 | 5,73 | 0,75 | 17,97 | 156 | 9,3 | 14,2 | 43 | 41 | 17 | 21 | 0,12 | 0,36 |
| Korngröße 0/4 | 0,14 | 6,11 | 4,64 | 1,47 | 19,42 | 134 | 12,3 | 18,7 | 45 | 23 | 20 | 21 | 0,12 | 0,84 |
| | 0,12 | 5,2 | 3,95 | 1,25 | 20,9 | 125 | 12,8 | 19,6 | 53 | 22 | 23 | 25 | 0,14 | 0,65 |
| | 0,12 | 5,53 | 4,24 | 1,29 | 19,59 | 130 | 15,0 | 20,5 | 52 | 23 | 23 | 28 | 0,12 | 0,35 |
| | 0,15 | 6,05 | 5,17 | 0,88 | 18,14 | 161 | 8,1 | 10,1 | 47 | 19 | 41 | 14 | 0,13 | 0,14 |
| Mittelwert | 0,14 | 5,9 | 4,7 | 1,1 | 19,2 | 141 | 11,5 | 16,6 | 48,0 | 25,6 | 24,8 | 21,8 | 0,13 | 0,47 |
| Standardabweichung | 0,01 | 0,45 | 0,64 | 0,27 | 1,07 | 15 | 2,5 | 3,9 | 3,90 | 7,84 | 8,40 | 4,71 | 0,01 | 0,25 |
| obere Grenze | 0,15 | 6,44 | 5,54 | 1,46 | 20,53 | 159 | 14,6 | 21,5 | 52,84 | 35,33 | 35,23 | 27,65 | 0,14 | 0,78 |
| untere Grenze | 0,12 | 5,31 | 3,95 | 0,79 | 17,88 | 123 | 8,4 | 11,8 | 43,16 | 15,87 | 14,37 | 15,95 | 0,12 | 0,16 |
| optimale Probenanzahl | 4 | 2 | 7 | 22 | 1 | 4 | 17,9 | 21,1 | 3 | 36 | 44,07 | 17,91 | 1,48 | 105,9 |
| Fraktion 2 | 0,13 | 6,51 | 6,29 | 0,22 | 16,18 | 178 | 10,0 | 12,5 | 25 | 8,27 | 15 | 22 | 0,11 | 0,25 |
| Korngröße 4/16 | 0,13 | 5,78 | 4,43 | 1,35 | 18,63 | 143 | 18,9 | 19,8 | 35 | 18 | 26 | 19 | 0,11 | 0,20 |
| | 0,11 | 5,34 | 5,06 | 0,28 | 17,49 | 152 | 15,6 | 20,6 | 31 | 6,83 | 22 | 22 | 0,11 | 0,18 |
| | 0,11 | 5,28 | 4,28 | 1 | 18,05 | 148 | 18,8 | 20,2 | 36 | 9,23 | 26 | 29 | 0,11 | 0,07 |
| | 0,16 | 6,33 | 5,89 | 0,44 | 15,2 | 179 | 9,1 | 8,4 | 45 | 38 | 38 | 14 | 0,12 | 0,12 |
| Mittelwert | 0,13 | 5,8 | 5,2 | 0,66 | 17,1 | 160 | 14,5 | 16,3 | 34,4 | 16,1 | 25,4 | 21,2 | 0,11 | 0,16 |
| Standardabweichung | 0,02 | 0,50 | 0,79 | 0,44 | 1,25 | 15 | 4,2 | 4,9 | 6,56 | 11,64 | 7,47 | 4,87 | 0,00 | 0,06 |
| obere Grenze | 0,15 | 6,47 | 6,17 | 1,21 | 18,67 | 179 | 19,7 | 22,4 | 42,55 | 30,52 | 34,68 | 27,25 | 0,12 | 0,24 |
| untere Grenze | 0,11 | 5,23 | 4,21 | 0,11 | 15,55 | 141 | 9,3 | 10,2 | 26,25 | 1,61 | 16,12 | 15,15 | 0,11 | 0,09 |
| optimale Probenanzahl | 8 | 1 | 9 | 174 | 1 | 3 | 32,2 | 35,2 | 14 | 202 | 33 | 20 | 0,49 | 53,7 |
| Fraktion 1 | 0,14 | 5,94 | 5,94 | 0 | 16,08 | 178 | 12,9 | 11,9 | 29 | 9,05 | 21 | 16 | 0,12 | 0,17 |
| Korngröße 16/32 | < 0,1 | 4,99 | 4,78 | 0,21 | 18,24 | 156 | 19,5 | 19,1 | 32 | 8,85 | 27 | 18 | 0,13 | 0,10 |
| | 0,12 | 5,44 | 5,29 | 0,15 | 17,24 | 164 | 15,4 | 21,3 | 37 | 5,81 | 24 | 19 | 0,12 | 0,19 |
| | < 0,1 | 5,2 | 4,84 | 0,36 | 17,31 | 164 | 17,5 | 14,5 | 31 | 10 | 25 | 16 | 0,11 | 0,05 |
| | 0,22 | 5,57 | 5,41 | 0,16 | 16,24 | 160 | 10,4 | 10,2 | 46 | 118 | 23 | 11 | 0,10 | 0,06 |
| Mittelwert | 0,16 | 5,43 | 5,25 | 0,18 | 17,02 | 164 | 15,1 | 15,4 | 35,00 | 30,34 | 24,00 | 16,00 | 0,12 | 0,11 |
| Standardabweichung | 0,04 | 0,32 | 0,42 | 0,12 | 0,79 | 7 | 3,2 | 4,2 | 6,10 | 43,85 | 2,00 | 2,76 | 0,01 | 0,06 |
| obere Grenze | 0,21 | 5,83 | 5,78 | 0,32 | 18,00 | 173 | 19,1 | 20,6 | 42,57 | 84,79 | 26,48 | 19,42 | 0,13 | 0,18 |
| untere Grenze | 0,11 | 5,03 | 4,73 | 0,03 | 16,04 | 155 | 11,1 | 10,2 | 27,43 | -24,11 | 21,52 | 12,58 | 0,10 | 0,04 |
| optimale Probenanzahl | 28 | 1 | 2 | 166 | 1 | 1 | 17,4 | 28,6 | 12 | 802 | 3 | 11 | 2,97 | 101,4 |

Tab. 12-14a. Hauptversuch 2 Vorsortierter Bauschutt: Stoffkonzentrationen bezogen auf Trockensubstanz

| | S | TC | TiC | TOC | Si | Ca | Al | Fe | Zn | Pb | Cr | Cu | Cd | Hg |
|------------------------------|------|-------|------|-------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] |
| Leichtgut | 0,41 | 24,93 | 2,47 | 22,46 | 16,57 | 98 | 18,2 | 19,8 | 62 | 97 | 135 | 33 | 0,10 | 0,80 |
| | 0,37 | 17,45 | 2,58 | 14,87 | 17,26 | 111 | 22,5 | 22,1 | 53 | 63 | 127 | 29 | 0,22 | 0,86 |
| | 0,41 | 28,73 | 1,43 | 27,3 | 16,39 | 80 | 22,5 | 21,9 | 72 | 21 | 97 | 33 | 0,26 | 0,90 |
| | 0,35 | 25,71 | 1,57 | 24,14 | 16,83 | 92 | 27,8 | 22,2 | 67 | 27 | 94 | 34 | 0,20 | 0,70 |
| | 0,34 | 9,09 | 2,97 | 6,12 | 18,08 | 117 | 13,3 | 12,6 | 73 | 22 | 93 | 19 | 0,17 | 0,21 |
| Mittelwert | 0,38 | 21,18 | 2,20 | 18,98 | 17,03 | 100 | 20,8 | 19,7 | 65,40 | 46,00 | 109,20 | 29,60 | 0,19 | 0,70 |
| Standardabweichung | 0,03 | 7,09 | 0,60 | 7,62 | 0,60 | 13 | 4,8 | 3,7 | 7,34 | 29,84 | 18,03 | 5,57 | 0,05 | 0,25 |
| obere Grenze | 0,41 | 29,99 | 2,95 | 28,44 | 17,77 | 116 | 26,8 | 24,3 | 74,51 | 83,05 | 131,58 | 36,52 | 0,26 | 1,01 |
| untere Grenze | 0,34 | 12,37 | 1,46 | 9,52 | 16,28 | 83 | 14,8 | 15,1 | 56,29 | 8,95 | 86,82 | 22,68 | 0,12 | 0,38 |
| optimale Probenanzahl | 2 | 43 | 28 | 62 | 0 | 7 | 20,7 | 13,4 | 5 | 162 | 10 | 14 | 32,5 | 50,1 |
| Abwassersediment | 0,27 | 9,93 | 4,98 | 4,95 | n.b. | 163 | 19,6 | 22,0 | 155 | 79 | 37 | 43 | 0,32 | 4,98 |
| | 0,27 | 12,26 | 4,83 | 7,43 | n.b. | 168 | 19,7 | 21,8 | 329 | 79 | 38 | 49 | 0,31 | 4,11 |
| | 0,17 | 8,63 | 3,91 | 4,72 | n.b. | 132 | 21,2 | 23,4 | 139 | 58 | 37 | 41 | 0,19 | 2,15 |
| | 0,22 | 11,21 | 4,46 | 6,75 | n.b. | 160 | 22,6 | 22,7 | 240 | 78 | 41 | 48 | 0,34 | 3,37 |
| | 0,25 | 6,97 | 5,33 | 1,64 | n.b. | 173 | 16,4 | 15,7 | 148 | 82 | 52 | 42 | 0,37 | 1,05 |
| Mittelwert | 0,24 | 9,80 | 4,70 | 5,10 | 16,50 | 159 | 19,9 | 21,1 | 202,2 | 75,2 | 41,0 | 44,6 | 0,31 | 3,13 |
| Standardabweichung | 0,04 | 1,87 | 0,48 | 2,01 | - | 14 | 2,0 | 2,8 | 73,0 | 8,7 | 5,7 | 3,3 | 0,06 | 1,39 |
| obere Grenze | 0,28 | 12,12 | 5,30 | 7,60 | - | 177 | 22,4 | 24,5 | 292,9 | 86,0 | 48,1 | 48,7 | 0,39 | 4,86 |
| untere Grenze | 0,19 | 7,48 | 4,10 | 2,60 | - | 141 | 17,4 | 17,7 | 111,5 | 64,4 | 33,9 | 40,5 | 0,23 | 1,40 |
| optimale Probenanzahl | 10 | 14 | 4 | 60 | - | 1 | 4,1 | 6,6 | 50 | 5 | 7 | 2 | 16,6 | 76,2 |

Tab. 12-15: Hauptversuch 2 Vorsortierter Bauschutt: Stoffflüsse

| | S [kg/h] | TC [kg/h] | TIC [kg/h] | TOC [kg/h] | Si [kg/h] | Ca [kg/h] | Al [kg/h] | Fe [kg/h] | Zn [kg/h] | Pb [kg/h] | Cr [kg/h] | Cu [kg/h] | Cd [g/h] | Hg [g/h] |
|------------------------------|-------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| Fraktion 3 (KG 0/4) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 27 | 1.147 | 927 | 220 | 3.751 | 2.755 | 225 | 325 | 0,94 | 0,50 | 0,48 | 0,43 | 2,50 | 9,18 |
| obere Grenze | 30 | 1.257 | 1.082 | 286 | 4.010 | 3.112 | 285 | 419 | 1,0 | 0,69 | 0,69 | 0,54 | 2,69 | 15,17 |
| untere Grenze | 23 | 1.037 | 772 | 155 | 3.491 | 2.399 | 164 | 230 | 0,84 | 0,31 | 0,28 | 0,31 | 2,31 | 3,20 |
| Fraktion 2 (KG 4/16) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 32 | 1.440 | 1.278 | 162 | 4.214 | 3.941 | 356 | 401 | 0,85 | 0,40 | 0,63 | 0,52 | 2,76 | 4,06 |
| obere Grenze | 37 | 1.594 | 1.520 | 297 | 4.597 | 4.403 | 484 | 552 | 1,0 | 0,75 | 0,85 | 0,67 | 2,88 | 5,94 |
| untere Grenze | 26 | 1.287 | 1.037 | 27 | 3.831 | 3.479 | 228 | 250 | 0,65 | 0,040 | 0,40 | 0,37 | 2,64 | 2,17 |
| Fraktion 1 (KG 16/32) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 22 | 738 | 714 | 24 | 2.313 | 2.233 | 206 | 209 | 0,48 | 0,41 | 0,33 | 0,22 | 1,57 | 1,49 |
| obere Grenze | 29 | 792 | 785 | 43 | 2.446 | 2.354 | 260 | 280 | 0,58 | 1,2 | 0,36 | 0,26 | 1,74 | 2,45 |
| untere Grenze | 14 | 683 | 642 | 4,4 | 2.180 | 2.111 | 151 | 138 | 0,37 | -0,3 | 0,29 | 0,17 | 1,40 | 0,54 |
| Eisenschrott | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | 134 |
| Leichtgut | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 10 | 546 | 57 | 490 | 439 | 257 | 53,8 | 50,8 | 0,169 | 0,119 | 0,282 | 0,076 | 0,48 | 1,79 |
| obere Grenze | 11 | 774 | 76 | 734 | 459 | 300 | 69,3 | 62,6 | 0,192 | 0,214 | 0,339 | 0,094 | 0,66 | 2,60 |
| untere Grenze | 8,8 | 319 | 38 | 246 | 420 | 214 | 38,3 | 39,0 | 0,145 | 0,023 | 0,224 | 0,059 | 0,31 | 0,99 |
| Abwassersediment | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 7,3 | 304 | 146 | 158 | 512 | 494 | 62 | 65 | 0,63 | 0,23 | 0,13 | 0,14 | 0,95 | 9,7 |
| obere Grenze | 8,8 | 376 | 164 | 236 | 550 | 550 | 70 | 76 | 0,91 | 0,27 | 0,15 | 0,15 | 1,2 | 15,1 |
| untere Grenze | 5,9 | 232 | 127 | 80 | 438 | 438 | 54 | 55 | 0,35 | 0,20 | 0,11 | 0,13 | 0,70 | 4,3 |
| Abwasser | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 12 | n.b. | n.b. | 2,1 | n.b. | 25 | 0,021 | 0 | 0 | 0 | 0,0049 | 0 | 0 | 0 |
| obere Grenze | 17 | n.b. | n.b. | 3,2 | n.b. | 44 | 0,033 | 0 | 0 | 0 | 0,0086 | 0 | 0 | 0 |
| untere Grenze | 7,2 | n.b. | n.b. | 1,0 | n.b. | 6,7 | 0,009 | 0 | 0 | 0 | 0,0012 | 0 | 0 | 0 |
| Summe: | | | | | | | | | | | | | | |
| sortierter Bauschutt | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 109 | 4.178 | 3.122 | 1.056 | 11.229 | 9.705 | 902 | 1.185 | 3,1 | 1,7 | 1,8 | 1,4 | 8,3 | 26,2 |
| obere Grenze | 133 | 4.796 | 3.628 | 1.599 | 11.513 | 10.763 | 1.168 | 1.524 | 3,8 | 3,1 | 2,4 | 1,7 | 9,2 | 41,2 |
| untere Grenze | 86 | 3.559 | 2.615 | 513 | 9.922 | 8.648 | 636 | 847 | 2,4 | 0,24 | 1,3 | 1,0 | 7,4 | 11,2 |

Tab. 12-16: Hauptversuch 2 Vorsortierter Bauschutt: Transferkoeffizienten

| | S | TC | TIC | TOC | Si | Ca | Al | Fe | Zn | Pb | Cr | Cu | Cd | Hg |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Fraktion 3 (KG 0/4) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,2432 | 0,2746 | 0,2969 | 0,2086 | 0,3340 | 0,2839 | 0,2489 | 0,2740 | 0,3068 | 0,3012 | 0,2618 | 0,3085 | 0,3025 | 0,3500 |
| obere Grenze | 0,3491 | 0,3532 | 0,4137 | 0,5564 | 0,4042 | 0,3598 | 0,4475 | 0,4951 | 0,4385 | 2,8205 | 0,5291 | 0,5192 | 0,3661 | 1,3494 |
| untere Grenze | 0,1751 | 0,2163 | 0,2127 | 0,0970 | 0,3032 | 0,2229 | 0,1408 | 0,1511 | 0,2243 | 0,1008 | 0,1170 | 0,1811 | 0,2516 | 0,0775 |
| Fraktion 2 (KG 4/16) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,2887 | 0,3448 | 0,4095 | 0,1535 | 0,3753 | 0,4061 | 0,3949 | 0,3383 | 0,2773 | 0,2384 | 0,3382 | 0,3784 | 0,3339 | 0,1547 |
| obere Grenze | 0,4342 | 0,4477 | 0,5811 | 0,5793 | 0,4634 | 0,5091 | 0,7613 | 0,6515 | 0,4453 | 3,0726 | 0,6568 | 0,6455 | 0,3916 | 0,5287 |
| untere Grenze | 0,1951 | 0,2684 | 0,2858 | 0,0168 | 0,3328 | 0,3233 | 0,1954 | 0,1643 | 0,1720 | 0,0129 | 0,1655 | 0,2169 | 0,2875 | 0,0527 |
| Fraktion 1 (KG 16/32) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,1991 | 0,1766 | 0,2287 | 0,0226 | 0,2060 | 0,2300 | 0,2282 | 0,1765 | 0,1556 | 0,2484 | 0,1763 | 0,1576 | 0,1901 | 0,0570 |
| obere Grenze | 0,3395 | 0,2226 | 0,3001 | 0,0846 | 0,2466 | 0,2722 | 0,4092 | 0,3308 | 0,2459 | 4,7099 | 0,2768 | 0,2538 | 0,2369 | 0,2178 |
| untere Grenze | 0,1088 | 0,1424 | 0,1771 | 0,0028 | 0,1894 | 0,1961 | 0,1296 | 0,0908 | 0,0992 | -0,107 | 0,1219 | 0,0994 | 0,1526 | 0,0131 |
| Leichtgut | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,0888 | 0,1308 | 0,0182 | 0,4637 | 0,0391 | 0,0265 | 0,0596 | 0,0429 | 0,0552 | 0,0715 | 0,1523 | 0,0553 | 0,0586 | 0,0684 |
| obere Grenze | 0,1244 | 0,2174 | 0,0291 | 1,4295 | 0,0462 | 0,0347 | 0,1089 | 0,0740 | 0,0817 | 0,8758 | 0,2610 | 0,0906 | 0,0896 | 0,2313 |
| untere Grenze | 0,0659 | 0,0666 | 0,0104 | 0,1536 | 0,0365 | 0,0199 | 0,0328 | 0,0256 | 0,0386 | 0,0075 | 0,0934 | 0,0340 | 0,0337 | 0,0240 |
| Abwassersediment | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,0670 | 0,0727 | 0,0467 | 0,1497 | 0,0456 | 0,0509 | 0,0684 | 0,0552 | 0,2051 | 0,1404 | 0,0687 | 0,1002 | 0,1149 | 0,3699 |
| obere Grenze | 0,1025 | 0,1055 | 0,0629 | 0,4590 | 0,0000 | 0,0636 | 0,1093 | 0,0899 | 0,3858 | 1,0898 | 0,1146 | 0,1450 | 0,1624 | 1,3410 |
| untere Grenze | 0,0441 | 0,0484 | 0,0350 | 0,0503 | 0,0000 | 0,0407 | 0,0461 | 0,0360 | 0,0920 | 0,0649 | 0,0438 | 0,0731 | 0,0768 | 0,1052 |
| Abwasser | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,1130 | 0,0005 | n.b. | 0,0020 | n.b. | 0,0026 | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | 0,0026 | n.b. | n.b. | n.b. |
| obere Grenze | 0,2039 | 0,0009 | n.b. | 0,0061 | n.b. | 0,0051 | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | 0,0066 | n.b. | n.b. | n.b. |
| untere Grenze | 0,0546 | 0,0002 | n.b. | 0,0006 | n.b. | 0,0006 | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | 0,0005 | n.b. | n.b. | n.b. |
| Eisenschrott | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | | | | | | | | 0,113 | | | | | | |
| obere Grenze | | | | | | | | 0,158 | | | | | | |
| untere Grenze | | | | | | | | 0,088 | | | | | | |

Tab. 12-17: Hauptversuch 2 Betonabbruch: Stoffkonzentrationen im Abwasser

| | TOC [mg C/l] | Chlorid [mg/l] | Sulfat [mg/l] | Ca [mg/l] | Al [µg/l] | Cd [µg/l] | Cr [µg/l] | Cu [µg/l] | Fe [µg/l] | Zn [µg/l] | Pb [µg/l] | Hg [µg/l] |
|--------------------|-----------------|-------------------|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Abwasser 1 | 6,5 | 8,2 | 48 | 112 | 627 | <0,05 | 5,2 | 20,03 | <10 | <4 | <1,0 | <0,1 |
| Abwasser 2 | 2,5 | 10,3 | 71 | 26,1 | 47 | <0,05 | <2 | <2,5 | <10 | <4 | <1,0 | <0,1 |
| Abwasser 3 | 2 | 7,8 | 69 | 27,1 | 47 | <0,05 | <2 | 2,96 | <10 | <4 | <1,0 | <0,1 |
| Abwasser 4 | 2 | 4,18 | 32,3 | 59,3 | 262 | <0,05 | 5,0 | <2,5 | <5 | <1 | <1 | <0,1 |
| Abwasser 5 | 4,2 | 3,83 | 43,1 | 47,4 | 723 | <0,05 | 3,6 | 6,6 | 6,0 | <1 | <1 | <0,1 |
| Mittelwert | 3,4 | 6,9 | 52,7 | 54,3 | 341 | <0,05 | 4,6 | 9,8 | 6,0 | <4 | <1 | <0,1 |
| Standardabweichung | 1,7 | 2,5 | 15,1 | 31,3 | 285 | | 0,7 | 7,3 | 0,0 | | | |
| obere Grenze | 5,6 | 9,9 | 71,4 | 93,1 | 695 | | 5,5 | 19,0 | 6,0 | | | |
| untere Grenze | 1,3 | 3,8 | 34,0 | 15,4 | -13,3 | | 3,7 | 0,7 | 6,0 | | | |

Tab. 12-18: Hauptversuch 2 Betonabbruch: Stoffkonzentrationen bezogen auf Trockensubstanz

| | S | TC | TIC | TOC | Si | Ca | Al | Fe | Zn | Pb | Cr | Cu | Cd | Hg |
|-----------------------------|-------|------|------|------|------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] |
| Fraktion 3 | 0,10 | 9,3 | 8,8 | 0,42 | 9,7 | 211 | 3,9 | 5,574 | 34 | 22 | 22 | 15 | 0,18 | 0,105 |
| Korngröße 0/4 | <0,1 | 9,6 | 9,4 | 0,18 | 9,4 | 229 | 3,2 | 3,476 | 17 | 3,35 | 9 | 5 | 0,10 | 0,025 |
| | 0,15 | 7,4 | 7,0 | 0,41 | 15 | 213 | 5,2 | 7,672 | 34 | 7,21 | 14 | 18 | 0,098 | 0,03 |
| | 0,14 | 8,3 | 8,1 | 0,15 | 12 | 219 | 4,6 | 5,672 | 26 | 4,54 | 14 | 7 | 0,087 | 0,024 |
| | 0,16 | 7,6 | 7,5 | 0,08 | 14 | 208 | 5,4 | 7,09 | 30 | 7,26 | 16 | 14 | 0,09 | 0,028 |
| Mittelwert | 0,14 | 8,4 | 8,2 | 0,2 | 12 | 216 | 4,4 | 5,9 | 28,2 | 8,9 | 15,0 | 11,8 | 0,1 | 0,04 |
| Standardabweichung | 0,023 | 0,86 | 0,86 | 0,14 | 2,1 | 7,52 | 0,79 | 1,5 | 6,3 | 6,7 | 4,2 | 5,0 | 0,03 | 0,03 |
| obere Grenze | 0,17 | 9,50 | 9,2 | 0,42 | 14 | 226 | 5,4 | 7,7 | 36 | 17 | 20 | 18 | 0,15 | 0,08 |
| untere Grenze | 0,11 | 7,35 | 7,10 | 0,07 | 9,3 | 207 | 3,5 | 4,1 | 20 | 0,51 | 9,8 | 5,6 | 0,07 | 0,00 |
| optimale Probenanzahl | 11 | 4,05 | 4,3 | 123 | 12 | 0,46 | 12 | 23 | 19 | 222 | 30 | 68 | 33 | 210 |
| Fraktion 2 | 0,23 | 7,6 | 7,3 | 0,27 | 12 | 204 | 6,2 | 8,2 | 150 | 197 | 18 | 50 | 0,233 | 0,065 |
| Korngröße 4/16 | <0,1 | 9,1 | 9,0 | 0,15 | 9,5 | 237 | 3,5 | 3,8 | 17 | 2,5 | 9 | <5 | 0,083 | 0,083 |
| | 0,1 | 7,97 | 7,8 | 0,15 | 12,7 | 236 | 4,2 | 5,6 | 19 | 2,9 | 8 | 8 | 0,054 | 0,018 |
| | 0,13 | 8,4 | 8 | 0,4 | 10,5 | 229 | 4,1 | 4,7 | 18 | 2,5 | 9 | 5 | 0,068 | 0,018 |
| | 0,11 | 8,57 | 8,2 | 0,37 | 10,1 | 235 | 4,1 | 4,2 | 16 | 2,3 | 13 | 5 | 0,069 | 0,019 |
| Mittelwert | 0,14 | 8,3 | 8,1 | 0,3 | 11,1 | 228 | 4,4 | 5,3 | 44 | 4,1 | 11 | 17 | 0,10 | 0,041 |
| Standardabweichung | 0,052 | 0,51 | 0,53 | 0,11 | 1,3 | 12 | 0,9 | 1,54 | 53 | 78 | 4 | 19 | 0,066 | 0,028 |
| obere Grenze | 0,21 | 9,0 | 8,7 | 0,40 | 13 | 243 | 5,6 | 7,21 | 110 | 138 | 16 | 41 | 0,18 | 0,075 |
| untere Grenze | 0,08 | 7,7 | 7,4 | 0,14 | 9,5 | 213 | 3,3 | 3,37 | -22 | -55 | 7 | -7 | 0,019 | 0,006 |
| optimale Probenanzahl | 50 | 1,5 | 1,7 | 60 | 5,1 | 1,1 | 17 | 33 | 558 | 1,353 | 41 | 485 | 165 | 181 |
| Fraktion 1 | 0,3 | 6,7 | 6,6 | 0,05 | 12,9 | 204 | 7,7 | 8,8 | 42 | 28 | 20 | 7 | 0,242 | 0,028 |
| Korngröße 16/32 | <0,1 | 9,1 | 8,8 | 0,3 | 8,7 | 242 | 2,9 | 3,4 | 14 | 2,1 | 8 | <5 | 0,13 | 0,014 |
| | 0,12 | 7,2 | 6,9 | 0,3 | 13,4 | 222 | 4,4 | 6,5 | 39 | 6 | 9 | 11 | 0,12 | 0,023 |
| | 0,17 | 7,8 | 7,4 | 0,39 | 11,5 | 234 | 4,8 | 5,9 | 20 | 3,1 | 13 | 6 | 0,11 | 0,017 |
| | 0,12 | 8,2 | 7,7 | 0,47 | 11,1 | 231 | 4,11 | 7,2 | 18 | 3,3 | 10 | 5 | 0,14 | 0,023 |
| Mittelwert | 0,18 | 7,8 | 7,5 | 0,3 | 11,5 | 227 | 4,8 | 6,3 | 27 | 8,5 | 12 | 7,3 | 0,15 | 0,021 |
| Standardabweichung | 0,07 | 0,83 | 0,76 | 0,14 | 1,6 | 13,1 | 1,6 | 1,8 | 12 | 9,8 | 4,3 | 2,3 | 0,049 | 0,0049 |
| obere Grenze | 0,27 | 8,8 | 8,4 | 0,48 | 13,6 | 243 | 6,8 | 8,5 | 41 | 21 | 17 | 10 | 0,21 | 0,027 |
| untere Grenze | 0,09 | 6,7 | 6,5 | 0,13 | 9,5 | 210 | 2,8 | 4,2 | 12 | -3,7 | 6,6 | 4,4 | 0,08 | 0,015 |
| optimale Probenanzahl | 66 | 4,4 | 3,9 | 84 | 7,9 | 1,3 | 43 | 30 | 72 | 517 | 50 | 38 | 44 | 21 |
| Leichtgut Mittelwert | 0,38 | 8,0 | 5,9 | 2,1 | 13 | 200 | 7,8 | 9,0 | 36 | 6,8 | 114 | 17 | 0,17 | 0,038 |
| Abwassersediment | 0,18 | 9,0 | 8,0 | 1,1 | 11 | 219 | 9,7 | 8,3 | 60 | 23 | 25 | 20 | 0,33 | 0,17 |
| | 0,18 | 9,0 | 8,0 | 1,1 | n.b. | 219 | 9,7 | 8,3 | 60 | 23 | 25 | 20 | 0,33 | 0,17 |
| | 0,33 | 7,0 | 5,7 | 1,3 | n.b. | 206 | 15 | 13 | 78 | 24 | 38 | 37 | 0,24 | 0,11 |
| | 0,33 | 8,5 | 6,2 | 2,4 | n.b. | 201 | 16 | 13 | 97 | 26 | 34 | 36 | 0,32 | 0,15 |
| | 0,36 | 7,9 | 6,2 | 1,7 | n.b. | 211 | 12 | 11 | 67 | 17 | 36 | 28 | 0,31 | 0,095 |
| Mittelwert | 0,28 | 8,3 | 6,8 | 1,5 | 11 | 211 | 13 | 11 | 72 | 23 | 32 | 28 | 0,31 | 0,14 |
| Standardabweichung | 0,08 | 0,76 | 0,97 | 0,49 | 1,1 | 6,9 | 2,7 | 2,0 | 14 | 3,0 | 5,5 | 7,4 | 0,031 | 0,031 |
| obere Grenze | 0,37 | 9,3 | 8,0 | 2,1 | 13 | 220 | 16 | 13 | 90 | 26 | 38 | 37 | 0,35 | 0,18 |
| untere Grenze | 0,18 | 7,4 | 5,6 | 0,90 | 9,2 | 203 | 9,2 | 8,2 | 55 | 19 | 25 | 19 | 0,27 | 0,10 |
| optimale Probenanzahl | 32 | 3,24 | 7,8 | 40 | 17 | 0,41 | 17 | 14 | 14 | 6,8 | 12 | 26 | 4,2 | 20 |

Tab. 12-19: Hauptversuch 2 Betonabbruch: Stoffflüsse

| | S | TC | TIC | TOC | Si | Ca | Al | Fe | Zn | Pb | Cr | Cu | Cd | Hg |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [kg/h] | [g/h] | [g/h] |
| Fraktion 3 (KG 0/4) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 18 | 1.098 | 1.065 | 32 | 1.547 | 2.818 | 58 | 77 | 0,37 | 0,12 | 0,20 | 0,15 | 1,44 | 0,55 |
| obere Grenze | 22 | 1.238 | 1.205 | 55 | 1.885 | 2.940 | 71 | 100 | 0,47 | 0,22 | 0,26 | 0,23 | 1,97 | 1,06 |
| untere Grenze | 14 | 958 | 926 | 10 | 1.209 | 2.697 | 45 | 53 | 0,26 | 0,01 | 0,13 | 0,07 | 0,92 | 0,04 |
| Fraktion 2 (KG 4/16) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 27 | 1.603 | 1.552 | 52 | 2.128 | 4.390 | 85 | 102 | 0,85 | 0,80 | 0,22 | 0,33 | 1,95 | 0,78 |
| obere Grenze | 40 | 1.726 | 1.678 | 77 | 2.432 | 4.685 | 107 | 139 | 2,114 | 3 | 0,31 | 0,78 | 3,54 | 1,45 |
| untere Grenze | 15 | 1.480 | 1.425 | 26 | 1.824 | 4.095 | 63 | 65 | -420 | -1 | 0,13 | -0,13 | 0,36 | 0,12 |
| Fraktion 1 (KG 16/32) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 16 | 696 | 669 | 27 | 1.031 | 2.028 | 43 | 57 | 0,24 | 0,08 | 0,11 | 0,06 | 1,30 | 0,19 |
| obere Grenze | 24 | 789 | 753 | 43 | 1.214 | 2.173 | 60 | 76 | 0,37 | 0,19 | 0,16 | 0,09 | 1,85 | 0,24 |
| untere Grenze | 8 | 604 | 585 | 11 | 848 | 1.883 | 25 | 37 | 0,11 | -0,03 | 0,06 | 0,04 | 0,76 | 0,13 |
| Eisenschrott | | | | | | | | 100 | | | | | | |
| Leichtgut | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 2 | 32 | 24 | 8 | 53 | 80 | 3 | 4 | 0,01 | 0,00 | 0,05 | 0,01 | 0,07 | 0,02 |
| Abwassersediment | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 7 | 208 | 170 | 38 | 281 | 528 | 31 | 27 | 0,18 | 0,06 | 0,08 | 0,07 | 0,77 | 0,34 |
| obere Grenze | 9 | 231 | 200 | 53 | 549 | 549 | 40 | 33 | 0,22 | 0,07 | 0,10 | 0,09 | 0,87 | 0,44 |
| untere Grenze | 4 | 184 | 140 | 23 | 506 | 506 | 23 | 20 | 0,14 | 0,05 | 0,06 | 0,05 | 0,67 | 0,25 |
| Abwasser | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 4 | n.b. | n.b. | 0,77 | n.b. | 12 | 0,076 | n.n. | 0,00 | 0,00 | 0,001 | 0,002 | n.n. | n.n. |
| obere Grenze | 5 | n.b. | n.b. | 1,25 | n.b. | 21 | 0,155 | n.n. | 0,00 | 0,00 | 0,001 | 0,004 | n.n. | n.n. |
| untere Grenze | 3 | n.b. | n.b. | 0,29 | n.b. | 3 | -0,003 | n.n. | 0,00 | 0,00 | 0,001 | 0,000 | n.n. | n.n. |
| Summe: | | | | | | | | | | | | | | |
| Betonabbruch | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 74 | 3.638 | 3.480 | 158 | 5.040 | 9.856 | 220 | 366 | 1,65 | 1,05 | 0,65 | 0,62 | 5,53 | 1,88 |
| obere Grenze | 100 | 3.985 | 3.837 | 228 | 5.532 | 10.368 | 278 | 449 | 1,06 | 3,13 | 0,82 | 1,20 | 8,23 | 3,19 |
| untere Grenze | 44 | 3.227 | 3.076 | 70 | 3.880 | 9.184 | 156 | 276 | 0,51 | -1,04 | 0,38 | 0,03 | 2,70 | 0,54 |

Tab. 12-20: Hauptversuch 2 Betonabbruch: Transferkoeffizienten

| | S | TC | TIC | TOC | Si | Ca | Al | Fe | Zn | Pb | Cr | Cu | Cd | Hg |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Fraktion 3 (KG 0/4) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,2435 | 0,3017 | 0,3061 | 0,2047 | 0,3070 | 0,2860 | 0,2629 | 0,2100 | 0,2230 | 0,1102 | 0,3017 | 0,2467 | 0,2609 | 0,2936 |
| obere Grenze | 0,4910 | 0,3836 | 0,3918 | 0,7832 | 0,4859 | 0,3201 | 0,4538 | 0,3638 | 5,0934 | -0,216 | 0,6930 | 7,3944 | 0,7299 | 1,9581 |
| untere Grenze | 0,1422 | 0,2404 | 0,2412 | 0,0422 | 0,2186 | 0,2601 | 0,1620 | 0,1188 | 0,0834 | 0,0021 | 0,1547 | 0,0613 | 0,1113 | 0,0141 |
| Fraktion 2 (KG 4/16) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,3728 | 0,4407 | 0,4459 | 0,3269 | 0,4222 | 0,4454 | 0,3861 | 0,2783 | 0,5140 | 0,7609 | 0,3387 | 0,5251 | 0,3528 | 0,4153 |
| obere Grenze | 0,9042 | 0,5349 | 0,5457 | 1,0939 | 0,6268 | 0,5101 | 0,6892 | 0,5028 | 22,911 | -2,553 | 0,8116 | 24,768 | 1,3102 | 2,6738 |
| untere Grenze | 0,1507 | 0,3715 | 0,3714 | 0,1154 | 0,3296 | 0,3950 | 0,2250 | 0,1447 | -0,132 | -0,339 | 0,1583 | -0,107 | 0,0442 | 0,0362 |
| Fraktion 1 (KG 16/32) | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,2159 | 0,1914 | 0,1923 | 0,1713 | 0,2045 | 0,2058 | 0,1942 | 0,1552 | 0,1445 | 0,0724 | 0,1658 | 0,1041 | 0,2355 | 0,0999 |
| obere Grenze | 0,5471 | 0,2444 | 0,2449 | 0,6081 | 0,3129 | 0,2366 | 0,3880 | 0,2767 | 3,9713 | -0,178 | 0,4095 | 2,8511 | 0,6847 | 0,4486 |
| untere Grenze | 0,0770 | 0,1516 | 0,1526 | 0,0497 | 0,1532 | 0,1816 | 0,0901 | 0,0830 | 0,0346 | -0,011 | 0,0718 | 0,0329 | 0,0919 | 0,0417 |
| Leichtgut | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,0207 | 0,0088 | 0,0068 | 0,0537 | 0,0105 | 0,0081 | 0,0142 | 0,0098 | 0,0087 | 0,0026 | 0,0704 | 0,0109 | 0,0124 | 0,0081 |
| Abwassersediment | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,0938 | 0,0571 | 0,0489 | 0,2385 | 0,0557 | 0,0535 | 0,1422 | 0,0733 | 0,1098 | 0,0539 | 0,1219 | 0,1131 | 0,1384 | 0,1831 |
| obere Grenze | 0,2127 | 0,0717 | 0,0651 | 0,7507 | 0,0000 | 0,0598 | 0,2538 | 0,1201 | 2,4309 | -0,063 | 0,2531 | 2,9532 | 0,3205 | 0,8150 |
| untere Grenze | 0,0444 | 0,0462 | 0,0365 | 0,0988 | 0,0000 | 0,0488 | 0,0829 | 0,0457 | 0,0434 | 0,0151 | 0,0750 | 0,0396 | 0,0810 | 0,0776 |
| Abwasser | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | 0,0533 | n.b. | n.b. | 0,0049 | 0,0000 | 0,0012 | 0,0003 | n.b. | n.b. | n.b. | 0,0016 | n.b. | n.b. | n.b. |
| obere Grenze | 0,1207 | n.b. | n.b. | 0,0177 | 0,0000 | 0,0023 | 0,0010 | n.b. | n.b. | n.b. | 0,0032 | n.b. | n.b. | n.b. |
| untere Grenze | 0,0252 | n.b. | n.b. | 0,0013 | 0,0000 | 0,0003 | 0,0000 | n.b. | n.b. | n.b. | 0,0010 | n.b. | n.b. | n.b. |
| Eisenschrott | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelwert | | | | | | | | 0,2733 | | | | | | |
| obere Grenze | | | | | | | | 0,3624 | | | | | | |
| untere Grenze | | | | | | | | 0,2229 | | | | | | |