

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing./DI) der
Studienrichtung „Industrieller Umweltschutz- und Verfahrenstechnik“ an der
Montanuniversität Leoben.

Praktische Untersuchung der Feinfraktion von „EBS PREMIUM Quality“ und technisch- wirtschaftliche Planung einer großtechnischen Umsetzung

Vorgelegt von:

Georg Bohrn
9935158

Betreuer:

DI Dr. mont. Renato Sarc
DI (FH) Josef Adam
Prof. Dr. mont. Roland Pomberger

Leoben, 14.11.2016

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

AFFIDAVIT

I declare in lieu of oath, that I wrote this Thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

DANKSAGUNG

Ich möchte mich bei meiner Familie, zu der ich auch meine langjährige Freundin Nora zähle, bedanken. Sie haben mich so viele Jahre emotional und finanziell unterstützt und mich immer wieder bestärkt, meinen Weg zu gehen. Jeder Umweg wurde toleriert, wenn auch nicht immer begrüßt. Ich danke euch vielmals.

Weiters gilt mein Dank meinen Betreuern, Renato Sarc und Josef Adam, die mich während der Zeit stets unterstützt und viel gelehrt haben. Es ist ein freundschaftliches Verhältnis entstanden, das ich nicht missen möchte.

Gleiches gilt für den Lehrstuhl der Abfalltechnik und Abfallwirtschaft, allen voran Prof. Dr. Pomberger. Durch sein umfangreiches Wissen und das Können es motivierend zu vermitteln, hat auch er dazu beigetragen, dass ich meinen Weg gefunden habe.

Vielen Dank!!

Kurzfassung

Praktische Untersuchung der Feinfraktion von „EBS PREMIUM Quality“ und technisch-wirtschaftliche Planung einer großtechnischen Umsetzung

In Österreich befassen sich mehrere Unternehmen mit der Herstellung von qualitätsgesicherten Ersatzbrennstoffen (EBS), wovon eines die ThermoTeam Alternativbrennstoff GmbH (ThermoTeam) in Retznei ist. Die Produktionsanlage stellt aus Abfällen qualitativ hochwertigen Ersatzbrennstoff für die anschließende energetische Verwertung im u.a. benachbarten Zementwerk her. Das Ziel der gegenständlichen Zusammenarbeit war es, die Sinnhaftigkeit einer Anlagenerweiterung zu überprüfen und dadurch höhere Qualität und weitere Homogenisierung des produzierten EBS mit der Bezeichnung „EBS PREMIUM Quality“ zu erreichen.

Durch die umfangreichen Probenahmen des EBS an sechs unterschiedlichen Produktionstagen vor Ort und anschließende chemisch-physikalische Untersuchungen des EBS wurden fundierte Ergebnisse erarbeitet. Die entnommenen qualitätsgesicherten Proben wurden einerseits einer Siebung unterzogen und andererseits chemisch (u.a. Heizwert, Chlorgehalt, Schwermetallgehalt usw.) untersucht. Insgesamt sind sechs praktische Kleinversuche sowie ein Großversuch am Areal der EBS-Produktionsanlage durchgeführt worden. Grund für die Siebanalysen ist die Überlegung, dass eine Abtrennung der EBS-Feinfraktion (≤ 5 mm) zu einer (deutlichen) Verbesserung der Verbrennungseigenschaften des verbleibenden EBS führen könnte. Der Nachweis soll über die anschließende chemische Analytik erbracht werden.

Die Auswertungen der umfangreichen Untersuchungen des EBS zeigten, dass eine Abtrennung der EBS-Feinfraktion und eine anschließende Nachzerkleinerung die Qualität des hergestellten „EBS PREMIUM Quality neu“ steigern. Vor allem die Verbrennungseigenschaften profitieren von dieser zusätzlichen Aufbereitung des EBS. Der „EBS PREMIUM Quality neu“ empfiehlt sich für den Einsatz in der Primärfeuerung von Zementwerken, die verbleibende Feinfraktion kann in der Sekundärfeuerung energetisch verwertet werden.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in eine technisch-wirtschaftliche Planung einer großtechnischen Umsetzung eingeflossen. Zwei Szenarien sind besprochen und bewertet worden. Szenario A umfasst nur eine Siebung des EBS, die der Produktion nachgeschaltet ist und so den Output in einen hochkalorischen „EBS PREMIUM Quality neu“ und eine mittelkalorische EBS-Feinfraktion teilt. Im Szenario B wird der produzierte „EBS PREMIUM Quality neu“ einem weiteren Feinzerkleinerungsschritt unterzogen, welcher die Verbrennungseigenschaften weiter verbessert. Das Szenario A hat den Vorzug bekommen, da die zusätzliche Zerkleinerung des Ersatzbrennstoffs derzeit keine große Bedeutung für die Hauptkunden des Unternehmens ThermoTeam hat.

Abstract

Practical examination of fine fraction from “EBS Premium quality” and technical as well as economic planning of large scale implementation

In Austria, there are several companies producing quality assured alternative fuel and ThermoTeam Alternativbrennstoff GmbH (ThermoTeam) in Retznei is one of them. In the plant waste is processed into high quality solid recovered fuel (EBS) that is used for energy recovery in their nearby located cement plant. The aim of the present cooperation was to check the feasibility in case of expanding the plant in order to achieve higher quality and better homogenization of the SRF called “EBS PREMIUM Quality”.

Do to extensive sampling at six different production days and subsequent chemical-physical analysis of the EBS, substantiated results have been obtained. The quality assured samples taken have been chemically analysed (e. g. caloric value, chlorine content and heavy metals content) and classified (i.e. sieve analysis). In total, six small technical trails and a large scale trail have been performed at the area of ThermoTeam. The reason for the sieve analysis is an idea that a separation of the EBS fine fraction will lead to an (significant) improvement in combustion properties of the residual material. The proof should be provided via subsequent chemical tests.

The evaluations of the extensive investigations of the EBS have shown that the separation of the EBS-fine fraction and a subsequent shredding improved the quality of the produced “EBS PREMIUM Quality neu”. Especially the combustion properties benefit from this additional treatment. “EBS PREMIUM Quality neu” is suitable for usage in primary firing of cement kiln. The remaining fine fraction can be used in secondary firing system.

The results gained from the presented investigations have been used as a basis for technical and economic planning of a large scale implementation. Two scenarios have been discussed and evaluated. Scenario A considers screening of the SRF only and it would be installed at the end of the production line, splitting the EBS in a high caloric “EBS PREMIUM Quality neu” and a medium caloric EBS fine fraction. In the scenario B, “EBS PREMIUM Quality neu” produced is processed in a further fine shredder which increases the combustion properties of the material.

Finally, scenario A is given the priority as the additional shredding step is currently not of great importance for the main costumers of the ThermoTeam.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 EINLEITUNG	3
1.1 Problemstellung	4
1.2 Zielsetzung	4
2 ERSATZBRENNSTOFFE UND BEISPIEL FÜR EINE PRODUKTIONSANLAGE	5
2.1 Ersatzbrennstoffe.....	5
2.2 Einsatz von EBS im Zementwerk.....	6
2.3 ThermoTeam	7
2.3.1 Beschreibung der Anlage und Verfahrensschritte	8
3 PLANUNG DER VERSUCHE UND DER PROBENAHME	15
3.1 Rechtliche Bestimmungen für Probenahmen.....	15
3.1.1 Abfallverbrennungsverordnung (AVV).....	15
3.1.2 ÖNORM EN 15442 Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Probenahme	15
3.2 Probenahmeplanung.....	16
3.2.1 Definition der Zielsetzung.....	16
3.2.2 Definition der Partie und des Partieumfangs	16
3.2.3 Bestimmung des Probenahmeverfahrens	17
3.2.4 Bestimmung der Anzahl der Einzelproben	17
3.2.5 Bestimmung des Proben-Mindestumfangs.....	17
3.2.6 Bestimmung der Mindestmenge einer Einzelprobe	18
3.2.7 Bestimmung des effektiven Probenumfangs	19
3.3 Planung des Großversuchs	19
4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	21
4.1 Probenahme Kleinversuch 1	24
4.2 Probenahme Kleinversuch 2.....	26
4.3 Probenahme Kleinversuch 3.....	28
4.4 Probenahme Kleinversuch 4.....	29
4.5 Probenahme Kleinversuch 5.....	31
4.6 Probenahme Kleinversuch 6.....	32
4.7 Probenahme Großversuch.....	32
5 ANALYSEN UND AUSWERTUNGEN.....	36
5.1 Siebanalysen	36

5.1.1	Siebanalyse Kleinversuch 1	36
5.1.2	Siebanalyse Kleinversuch 2	39
5.1.3	Siebanalyse Kleinversuch 3	40
5.1.4	Siebanalyse Kleinversuch 4	41
5.1.5	Siebanalyse Kleinversuch 5	42
5.1.6	Siebanalyse Kleinversuch 5 Teil 2	43
5.1.7	Siebanalyse Kleinversuch 6	44
5.1.8	Siebanalyse Großversuch.....	48
5.2	Chemische Analysen	52
5.2.1	Chemische Analyse Kleinversuch 1	53
5.2.2	Chemische Analyse Kleinversuch 2	53
5.2.3	Chemische Analyse Kleinversuch 3	54
5.2.4	Chemische Analyse Kleinversuch 4	54
5.2.5	Chemische Analyse Kleinversuch 5	55
5.2.6	Chemische Analyse Kleinversuch 5 Teil 2	55
5.2.7	Chemische Analyse Großversuch	56
5.3	Interpretation der Analysenergebnisse	56
5.3.1	Interpretation der Siebanalysen	57
5.3.2	Interpretation der chemischen Analysen	60
6	DISKUSSION.....	67
6.1	Probenahmefehler	67
6.2	Qualitätseigenschaften von Ersatzbrennstoffen.....	70
6.3	Auswirkungen einer Abtrennung der Feinfraktion	71
7	TECHNISCH-WIRTSCHAFTLICHE PLANUNG DER GROßTECHNISCHEN UMSETZUNG	74
8	ZUSAMMENFASSUNG	78
9	VERZEICHNISSE	80
9.1	Literatur.....	80
9.2	Abkürzungsverzeichnis	81
9.3	Tabellen.....	82
9.4	Abbildungen.....	84
ANHANG.....	I

1 Einleitung

In der heutigen Zeit ist Kunststoff ein weit verbreitetes Material mit vielen Einsatzgebieten. Besonders in der Verpackungsindustrie sind verschiedene Arten von Kunststoffen in einer besonders hohen Vielfalt vertreten. So ist es auch nicht verwunderlich, dass diese Materialien in großer Menge als Abfall anfallen.

Ein Weg, diesen Kunststoffabfall einer vernünftigen Nutzung zuzuführen, besteht neben der stofflichen Verwertung in der energetischen Verwertung als Ersatzbrennstoff (EBS). Als EBS gelten Abfälle, die im ganzen Umfang oder zu einem relevanten Anteil zur Energiegewinnung eingesetzt werden. Als relevanter Anteil gilt, wenn ein Abfall selbständig und ohne Zufeuerung verbrennen kann. Neben diesem Kriterium muss der Abfall weitere Vorgaben hinsichtlich seiner Qualität erfüllen, die auf den spezifischen Einsatz des Materials zugeschnitten sind. [1. S. 3]

Ersatzbrennstoffe werden in Österreich seit den 90er Jahren in der Zementindustrie eingesetzt. EBS sind Abfälle, die zur Gänze oder in einem relevanten Ausmaß zum Zweck der Energiegewinnung eingesetzt werden und die die Qualitätskriterien gemäß der österreichischen Abfallverbrennungsverordnung (AVV) erfüllen. Die Qualitätskriterien gemäß AVV sind die sogenannten statistischen Grenzwerte, d.h. ausgedrückt als Median und 80-er Perzentil, für acht Schwermetalle (d.h. Sb, As, Pb, Cd, Cr, Co, Ni und Hg), deren Gehalt auf den Nettoheizwert $[mg/MJ_{TS}]$ des Brennstoffes bezogen ist. [1]

Damit aus gemischten nicht gefährlichen Abfällen hergestellte EBS in Anlagen zur Zementerzeugung eingesetzt werden können, müssen neben o.a. rechtlichen Anforderungen auch weitere Qualitätskriterien eingehalten werden. Normalerweise beinhalten diese u.a. folgende Parameter [2], [3]:

- Korngröße (d_{90} oder d_{95}) [mm],
- Aschegehalt $[\%_{TM}]$,
- Wassergehalt $[\%_{OS}]$,
- Schwefelgehalt $[\%_{TM}]$,
- Nettoheizwert $[MJ/kg_{OS}]$,
- biogener Kohlenstoffgehalt $[\%]$,
- Chlorgehalt $[\%_{TM}]$,
- weitere Beschränkungen $[mg/kg_{TM}]$ für Schwermetalle (z.B. Mn, Sn, Ti, V, Zn).

Da ThermoTeam u.a. unterschiedliche Lieferanten mit unterschiedlicher Materialqualität hat und das Material selbst auch Qualitätsunterschiede im Winter und Sommer zeigt, ist es wichtig den technischen Prozess so zu betreiben und zu optimieren, dass die Schwankungen des für die nachfolgende energetische Verwertung produzierten EBS so gering wie möglich gehalten werden.

1.1 Problemstellung

Um den problemlosen Einsatz von kunststoffhaltigen EBS in der Zementindustrie zu gewährleisten, sind bestimmte qualitative Eigenschaften zu erfüllen.

Wie bereits angemerkt, ist das Ausgangsmaterial für die Produktion von EBS bei ThermoTeam einerseits von unterschiedlichen Lieferanten und andererseits sehr heterogen. Somit ist es verständlich, dass das Erreichen der gewünschten Qualität einige technische und materialspezifische Herausforderungen mit sich bringen kann. Es soll ein Produkt (im anlagentechnischen Sinn, da EBS per Abfallverbrennungsverordnung (d.h. rechtlich) als Abfall eingestuft ist) mit gesicherter und konstanter Qualität und optimalen energetischen Eigenschaften hergestellt werden. Die heterogene Qualität führt bei der energetischen Verwertung von EBS im Zementwerk zu Schwankungen der Flamme, Flammentemperatur, ungleichmäßiger Verteilung der Energie usw., das in weiterer Folge zu Prozessstörungen führen kann. Damit die (soweit wie möglich) konstante Qualität von EBS gewährleistet wird, ist die Verfahrensweise der Herstellung von EBS ständig evaluiert, um das bestmögliche Material an die Industrie weitergeben zu können.

Das Unternehmen ThermoTeam befasst sich seit beinahe zwei Jahrzehnten mit der Frage, wie die Herstellung von kunststoffhaltigen EBS zur anschließenden energetischen Verwertung bzw. Substitution von primären Energieträgern optimiert werden kann. EBS PREMIUM Quality wird das Hauptprodukt genannt, das am Standort Retznei/Ehrenhausen in der Steiermark hergestellt wird und in Zementwerken Einsatz findet. Der Wille zur ständigen Verbesserung von Produkt und Umweltauswirkungen führen zu Überlegungen, das Verfahren der Produktion weiter auszubauen und dadurch gezielt zu optimieren.

1.2 Zielsetzung

Der Ansatz, die (heizwertärmere) Feinfraktion ($< 11,2$ mm) aus dem EBS PREMIUM Quality abzusieben bzw. teilweise abzusieben und einer energetischen Verwertung in der Sekundärfeuerung der Zementindustrie zuzuführen, ist zum ersten Mal von Sarc et al. [4] diskutiert und vorgeschlagen worden. Sarc et al. [4] zeigten in deren Untersuchungen, dass der höhere Heizwert in gröberer Fraktionen (d.h. $> 11,2$ mm) liegt und dass eine Absiebung der Feinfraktion einerseits zur Erhöhung und andererseits zur Stabilisierung des Heizwertes des „EBS PREMIUM Quality neu“ führen würde. [4]

Basierend auf o.a. Überlegungen wurde das Ziel der gegenständlichen Arbeit definiert. Durch weitere vor Ort Untersuchungen des EBS PREMIUM Quality soll die Qualität der nach der Siebung mit 5 mm Maschenweite gewonnenen Fraktionen (d.h. Feinfraktion und EBS PREMIUM Quality neu) weiter chemisch-physikalisch untersucht werden. Die materialspezifischen Erkenntnisse sollen dazu dienen, dass in weiterer Folge eine technisch-wirtschaftliche Planung einer großtechnischen Umsetzung bei ThermoTeam durchgeführt werden soll.

2 Ersatzbrennstoffe und Beispiel für eine Produktionsanlage

In diesem Kapitel sollen allgemein Ersatzbrennstoffe (EBS) und deren Herstellung und Verwendung erläutert werden.

2.1 Ersatzbrennstoffe

Bereits in den siebziger Jahren sind Versuche unternommen worden, Siedlungsabfälle aufzubereiten, um Wertstoffe zurückzugewinnen und Deponievolumen zu schonen. Es war zu beobachten, dass Europa und die USA verschiedene Wege einschlugen. Während in Europa versucht wurde, die Wertstoffe von dem unbrauchbaren Material zu trennen und diese wieder nutzbar zu machen, verfolgte man in den USA die Gewinnung der heizwertreichen Leichtfraktion. Diese unterschiedlichen Herangehensweisen ließen sich durch die Zusammensetzung der Siedlungsabfälle (Anteil der heizwertreichen Fraktion) erklären. In Europa waren bald Schwächen in der Trenntechnik feststellbar und die gewonnenen verwertbaren Fraktionen hatten eine zu geringe Qualität, sodass auch hier bald die Produktion von Ersatzbrennstoffen aus Siedlungsabfällen forciert wurde. [5, S. 7]

In Österreich wird der Begriff Ersatzbrennstoffe in der Abfallverbrennungsverordnung (AVV) folgendermaßen definiert: *„Abfälle, die zur Gänze oder in einem relevanten Ausmaß zum Zweck der Energiegewinnung eingesetzt werden und die die Vorgaben gemäß Anlage 8 erfüllen. Ein relevantes Ausmaß zum Zweck der Energiegewinnung liegt vor, wenn eine selbstgängige Verbrennung ohne Zusatzfeuerung möglich ist.“* [1, S. 3]

Als Ausgangsmaterialien für Ersatzbrennstoffe eignen sich alle Abfallfraktionen, die einen heizwertreichen Anteil haben. Dazu zählen Siedlungsabfälle, Sperrmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, Reste aus der Wertstoffsortierung und Produktionsabfälle. [5, S. 12]. Die in Österreich getrennt gesammelten Leichtverpackungsabfälle eignen sich besonders durch ihre hohe heizwertreiche Fraktion als ein Grundstoff für EBS. Dabei werden nicht die gesamten getrennt gesammelten Leichtverpackungen sondern nur die Reste aus Sortierung, d.h. nicht recycelbarer Anteil der Leichtverpackungsabfälle in EBS Produktionsanlagen eingesetzt.

Um Abfälle als Substitut in einer Mitverbrennungsanlage wie z.B. Zementindustrie einzusetzen, bedarf es einer Aufbereitung des Materials. Durch die Kombination mehrerer physikalischer Verfahren wie Zerkleinerung, Sortierung, Siebung, Sichtung, Verdichtung und Trocknung wird ein Stoff erzeugt, der die benötigten Verbrennungseigenschaften aufweist und ideal auf den Einsatzort abgestimmt ist. [5, S. 7]

Es gibt in Österreich mehrere Unternehmen, die sich mit der Produktion von Ersatzbrennstoffen beschäftigen, zu welchen auch das Unternehmen ThermoTeam in der Steiermark gezählt werden kann. Folgend werden der Betrieb und das Produktionsverfahren zur Herstellung von EBS an diesem Standort beschrieben.

Als Abnehmer für Ersatzbrennstoffe kommen Industriezweige in Frage, die hochenergetische Prozesse betreiben und energieerzeugende Unternehmen. Beispiele für

Mitverbrennungsanlagen sind Zementwerke, Kraftwerke und sonstige Mitverbrennungsanlagen [1, S. 4]

2.2 Einsatz von EBS im Zementwerk

Die Zementindustrie ist eine Branche, in der zur Erzeugung der Produkte eine hohe Menge an Energie (3.788 MJ/t Klinker; [6, S. 13]) notwendig ist. Zur Herstellung von Zement werden im Drehrohrofen Gastemperaturen bis zu 2.000 °C (Primärfeuerung) erreicht. An anderen Stellen des Ofens (Sekundärfeuerung) sind geringere Temperaturen (850 – 1.100 °C) zu finden. In Abbildung 1 sind die Brennstoffaufgabemöglichkeiten dargestellt. Das Material, das bei der Primärfeuerung aufgegeben wird, muss hohen Qualitätsansprüchen genügen. Es muss homogen, heizwertreich und blasförmig vorliegen, um keine Probleme bei der Verwertung (Verklumpen, Anbackungen) zu erzeugen. [20, S. 32f.]

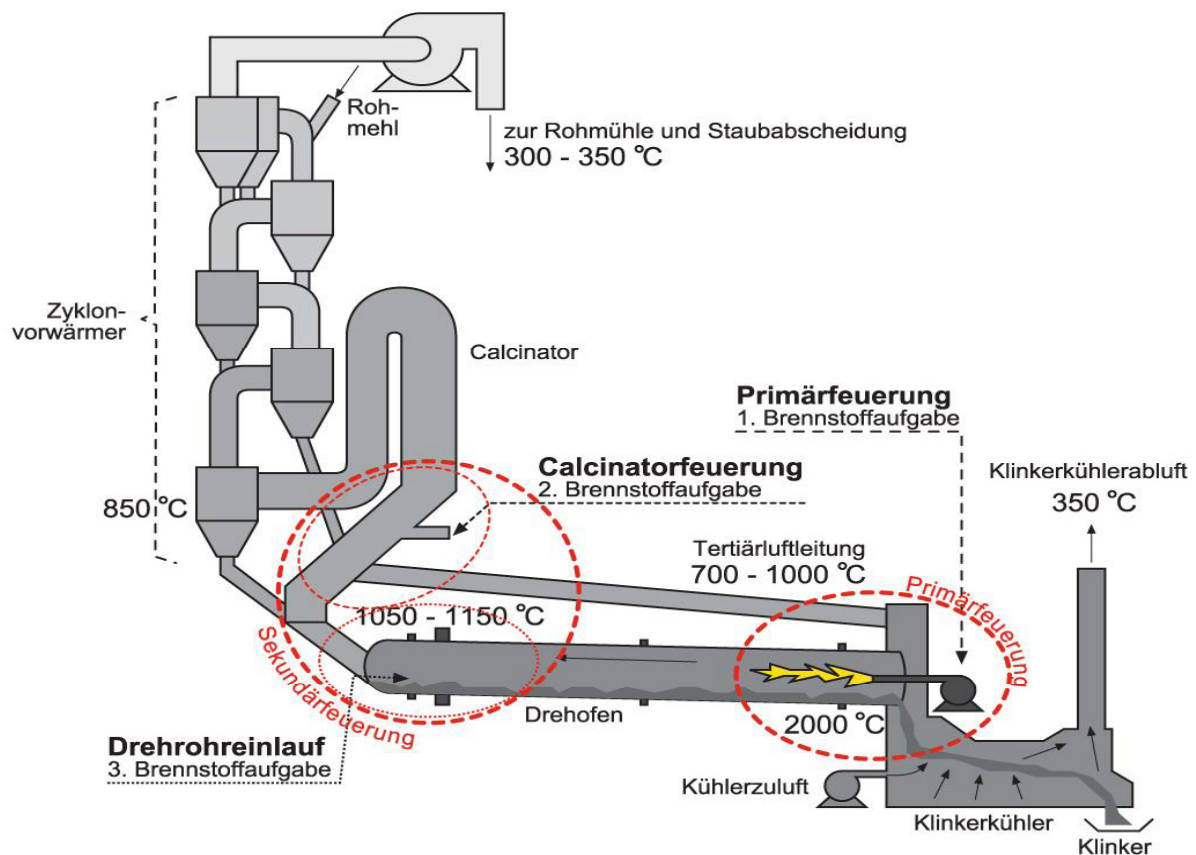


Abbildung 1: Aufgabestellen für Ersatzbrennstoffe im Zementwerk [20, S. 33]

Der qualitativ hochwertige Brennstoff wird in der Primärfeuerung durch Einblasen mittels Brennerlanze in den Drehrohrofen eingebracht. Hier ist es notwendig, gut brennbares Material einzusetzen, da die Verweilzeit in der Luft und somit die Reaktionszeit sehr gering ist. Das Material muss vollständig durchreagieren, bevor es auf den Klinker trifft und durch die Drehbewegung des Ofens untergemischt wird.

2.3 ThermoTeam

Die Unternehmen Saubermacher Dienstleistungs-Aktiengesellschaft (AG) und Lafarge Permoser haben sich 1999 entschieden, gemeinsam Ersatzbrennstoffe herzustellen. Aus diesem Grund entstand das Joint-Venture Unternehmen ThermoTeam, das anteilig folgendermaßen aufgeteilt ist (vgl. Abbildung 2). [7]

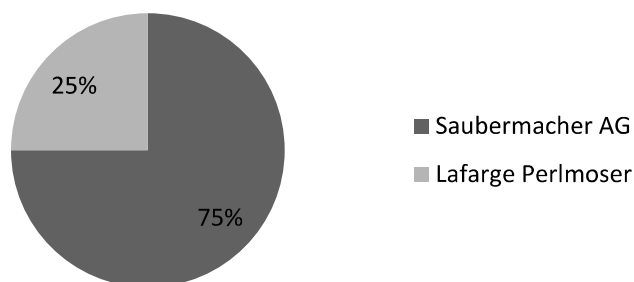


Abbildung 2: Verteilung des Besitzanteils von ThermoTeam [7]

Die Entstehung des Standortes ThermoTeam in Retznei kann durch die unten angeführte Tabelle 1 nachvollzogen werden.

Tabelle 1: Firmengeschichte ThermoTeam [7]

Datum	Ereignis
09/1999	Gründung der ARGE ThermoTeam
2000-2002	Forschungsprojekt
05/2002	Planung der Produktionsanlage
07/2002	Gründung ThermoTeam GmbH
09/2002	Baubeginn
06/2003	Fertigstellung und Eröffnung

In der Anlage werden heizwertreiche Abfallfraktionen aufbereitet und zu qualitativ hochwertigem Ersatzbrennstoff verarbeitet. Das Ausgangsmaterial wird zu einem großen Teil von der Saubermacher Dienstleistungs AG übergeben und kommt aus unterschiedlichsten Bereichen der Abfallwirtschaft, wie z.B. getrennt erfasste Produktionsabfälle, stofflich nicht verwertbare Kunststoffe aus der Sortierung von Verpackungen und geeignete vorbehandelte Fraktionen aus Gewerbeabfällen bzw. Siedlungsabfällen. [7]

Alle Inputmaterialien sind anderenorts aufbereitet worden mit Ausnahme der hochreinen Produktionsabfälle. Zu den Aufbereitungsanlagen zählen Splittinganlagen, mechanisch-biologische Anlagen (MBA) und Sortieranlagen. Das nachfolgende Fließbild (vgl. Abbildung 3) zeigt diesen Ablauf. [7]

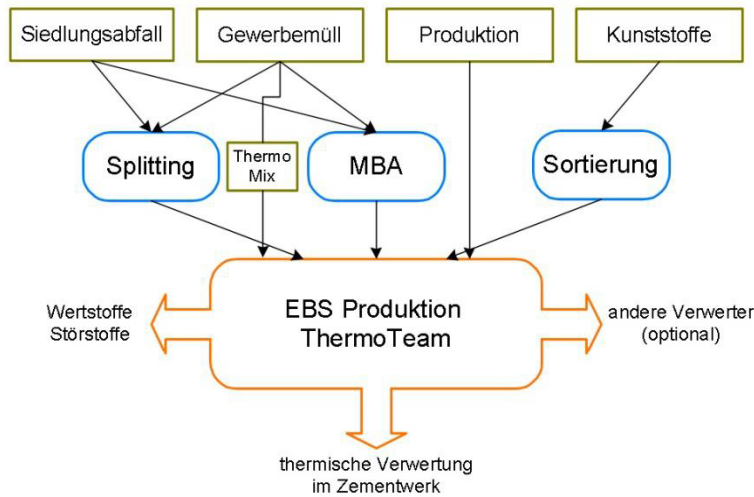


Abbildung 3: Herstellung von EBS am Standort ThermoTeam [7]

2.3.1 Beschreibung der Anlage und Verfahrensschritte

Um aus dem angelieferten Material einen einsatzfähigen qualitätsgesicherten Ersatzbrennstoff zu erzeugen, ist eine Vielzahl an Aufbereitungsvorgängen notwendig. Die unten angeführte Grafik (siehe Abbildung 4) zeigt schematisch den Verfahrensablauf am Standort.

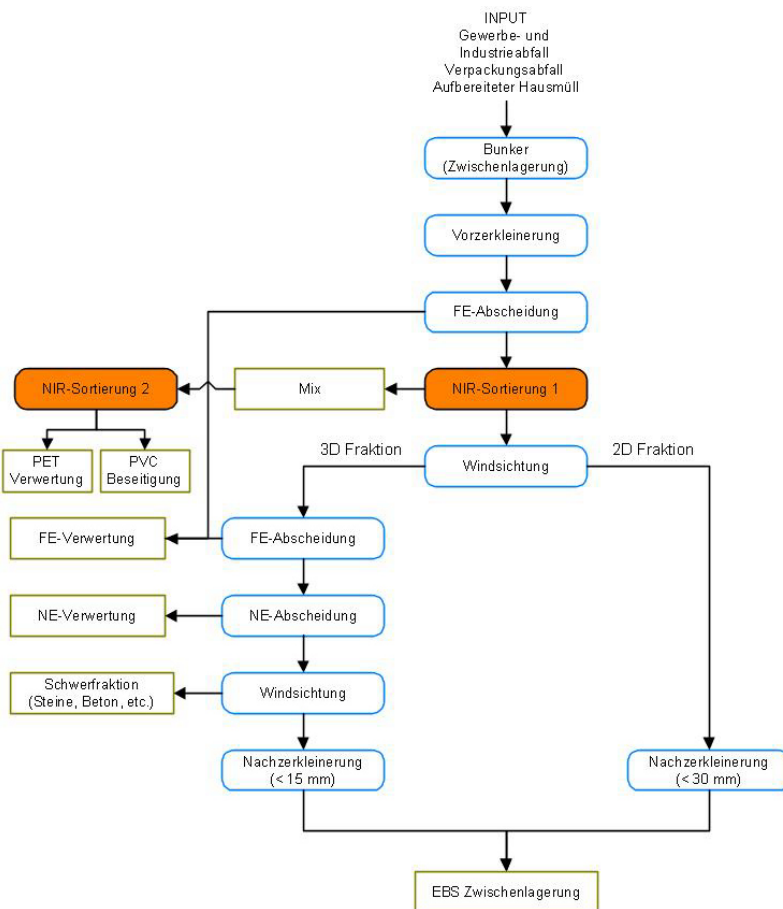


Abbildung 4: Schema der Ersatzbrennstoffherstellung ThermoTeam [8, S. 3]

Nachfolgend werden die Verfahrensschritte kurz beschrieben.

- **Zerkleinerung**

Die Zerkleinerung des Materials dient dazu, einen Aufschluss des Ballenverbunds zu bewerkstelligen und das Material bearbeitbar zu machen. Generell wird am Standort in (grobe) Vorzerkleinerung und (feine) Nachzerkleinerung unterschieden.

Vorzerkleinerung (Lindner Meteor 2200)

Die Vorzerkleinerung dient dem Aufschluss des Materials. Der vorsortierte (grobstückige) Abfall v. a. wird in Ballen angeliefert und kann so nicht verarbeitet werden. Das Aggregat der Vorzerkleinerung bricht die Ballenverbindungen auf und zerkleinert das Material soweit, sodass eine weitere Bearbeitung durch die nachgeschalteten Aggregate erfolgen kann.

Das Aggregat der Vorzerkleinerung ist ein langsam drehender Einwellenzerkleinerer. Die Aufgabe des Materials geschieht durch ein Förderband. Die Rotormesser an der Welle und die Gegenmesser (siehe Abbildung 5) sorgen für die gewünschte Zerkleinerung des Ausgangsmaterials. Ein Sieb hält das Material solange im Schneidraum, bis die erforderliche Korngröße (80 mm) erreicht ist, um passieren zu können. [9]

Die nachfolgende Abbildung 6 zeigt exemplarisch die verwendete Maschine.



Abbildung 5: Welle mit Rotormesser [9]



Abbildung 6: Vorzerkleinerer [9]

Nachzerkleinerung:

Ziel der Nachzerkleinerung ist es, die gewünschte und für die energetische Verwertung notwendige Korngröße des Endprodukts einzustellen. Während der Produktion des Ersatzbrennstoffs kommt es zu einer Aufteilung des Produktstroms in zwei Fraktionen:

- in den zweidimensionalen Anteil (2D Linie), der vorwiegend aus flugfähigem, folienähnlichem Material besteht,
- und den dreidimensionalen Anteil (3D Linie), dessen Inhalt u.a. Hohlkörper sind.

Die Funktionsweise der Nachzerkleinerungsaggregate unterscheidet sich nicht von jener der Vorzerkleinerung. Lediglich die Drehzahl der Welle ist höher, wodurch es möglich ist, einen höheren Durchsatz zu gewährleisten. [17]

In der 3D Linie sorgen zwei Rotorschneider mit einem Siebdurchmesser von jeweils 15 mm für die gewünschte Korngröße des Materials, in der 2D Linie kommen drei Einwellenzerkleinerer mit einem Siebdurchmesser von jeweils 35 mm zum Einsatz. Alle Aggregate werden abwechselnd betrieben.

- **Wert- und Störstoffabscheidung**

Das Aufgabematerial besteht aus Wert (erwünschten Stoffen)- und Störstoffen (in der Produktion von Ersatzbrennstoffen unerwünscht). Polyvinylchlorid (PVC) Materialien zählen zu diesen Störstoffen, da durch ihren hohen Chlorgehalt dieser Schadstoff in das Endprodukt eingetragen wird und so dessen Qualität verringert. Eisenmetalle (FE), Nichteisenmetalle (NE-Metalle) und Polyethylenterephthalat (PET) werden den Wertstoffen zugerechnet, da sich die Ausschleusung und der Verkauf der Fraktionen finanziell positiv auswirken.

Magnetsortierung

Um Eisen- und Nichteisenmetalle aus dem Gemengestrom auszuschneiden, bedient man sich der Magnetscheidung. Als Abtrennkriterium fungieren die magnetischen Eigenschaften des abzutrennenden Gutes. Folgende Tabelle zeigt eine Auflistung magnetischer Eigenschaften verschiedener metallischer Werkstoffe. [10, S. 27]

Tabelle 2: Magnetische Eigenschaften von Werkstoffen [10, S. 28]

Magnetisierbarkeit	Werkstoffe
stark magnetisch	Eisenwerkstoffe (z. B.: Kohlenstoffstahl, Eisengusswerkstoffe) Nickel, Ni-Cu-Legierungen > 65 % Ni
schwach magnetisch	Cu-Mehrstoff-Gusslegierungen (Bronzen)
nicht magnetisch	hochlegierte Stähle NE-Metalle (Aluminium, Kupfer, Zink) Edelmetalle

FE-Separation

Bei der Magnetscheidung kommen Permanentmagnete und Elektromagnete in zumeist trockener Anwendung zum Einsatz. Der Materialstrom wird über Schurren auf eine

Transportfläche aufgebracht und so über den Magneten geführt. Das magnetisierbare Material erfährt durch den Magneten eine Ablenkung wodurch eine Ausschleusung aus dem Strom erfolgt. In der Regel werden zwei verschiedene Bauweisen eingesetzt. Bei Trommelmagnetscheidern ist der Magnet Teil des Beförderungsbands und hält die Eisenfraktion zurück, sodass diese abgetrennt wird. Der Überbandmagnetscheider besitzt einen Aushebemagnet, der die magnetisierbaren Teile aus dem Gemengestrom abzieht und separat abwirft. Die Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigen die Ausführungen Trommelmagnetscheider und Überbandmagnetscheider sowie die ausgeschleuste Fraktion. Am Standort Thermo Team werden beide Verfahren eingesetzt. [10, S. 28]



Abbildung 7: Trommelmagnetscheider und ausgeschleuste Fraktion [11]



Abbildung 8: Überbandmagnetscheider [11]

NE-Separation

Die Aussortierung von Nichteisenmetallen aus einem Materialstrom erfolgt über Wirbelstromsortierer. Durch ein rotierendes Magnetfeld (Polrad) werden in elektrisch leitenden Teilchen Wirbelströme induziert. Das dadurch entstehende Magnetfeld ist dem des Polrads entgegengerichtet und führt so zu einer Abstoßung der leitenden Teile. Der Erfolg der Sortierung hängt von dem Verhältnis der Leitfähigkeit zur Dichte ab, aber auch von der Stückgröße der Teilchen. Abbildung 9 zeigt exemplarisch die Funktionsweise eines Wirbelstromscheiders und die ausgeschiedene Fraktion. [10, S. 29]



Abbildung 9: Wirbelstromscheider und ausgeschiedene Fraktion [11]

Inertstoffabscheidung

Eine weitere Störstofffraktion stellen Inertstoffe dar. Zu ihnen zählen Steine, Keramiken und Glas. Diese können Anlagenteile beschädigen und die Qualität des Endprodukts herabsetzen. Ähnlich der Windsichtung erfolgt die Abtrennung durch das Ausnutzen unterschiedlicher Sinkgeschwindigkeiten von Teilchen.

Das aufgegebene Material fällt durch die Bewegung des Aufgabebandes auf einen Lamellenvorhang, der von einem Gebläse mit Luft durchströmt wird. Die Leichtfraktion des aufzutrennenden Materials erfährt eine Richtungsänderung und wird so separat ausgetragen. Die Schwerfraktion hingegen passiert den Lamellenvorhang unbeeinflusst und wird an einer zweiten Austragungsstelle abgeführt. Dadurch wird die Selektion des Inertstoffes gewährleistet. Die nachfolgende Abbildung 10 zeigt exemplarisch die vor Ort befindliche Apparatur und die abgeschiedene Fraktion. [13, S. 1]



Abbildung 10: Inertstoffabscheider und abgeschiedene Fraktion [12]

- **Windsichtung**

Die Funktionsweise der Windsichtung basiert auf dem Prinzip der Sinkgeschwindigkeit von Teilchen in einem Fluid. Auch Luft wird als solches angesehen, deshalb zählt Windsichtung zu den Aerostromsichtern. In der Recyclingtechnik wird die Windsichtung eingesetzt, um Feingut bzw. Material mit geringer Dichte von Schwergut abzutrennen. In Verwendung sind meist zwei verschiedene Bauweisen: [10, S. 27]

- die Querstrom- und
- die Gegenstromsichtung.

In der unten angeführten Grafik (vgl. Abbildung 11) ist eine Kombination der beiden Verfahren dargestellt. Es erfolgt eine Vereinzelung des zu trennenden Gutes über einen Vibrationsförderer und Druckluftventile. Das Feingut (2D Fraktion) wird aus der Fallparabel abgelenkt, gegen die Trenntrommel geschleudert und so vom Grobgut (3D Fraktion) getrennt. [10, S. 27]

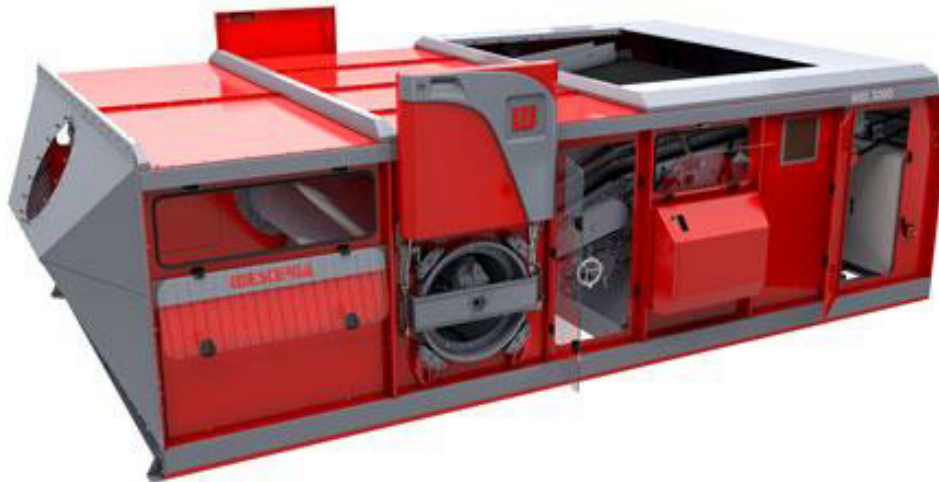


Abbildung 11: Windsichter [12]

- **Nahinfrarot-Sortierung**

Bei diesem Sortierverfahren kommt elektromagnetische Strahlung, die im Nahinfrarot (NIR)-bereich arbeitet, zum Einsatz. Durch die Bestrahlung des Sortierguts kommt es zur Ausprägung charakteristischer Reflexionseigenschaften. Diese Eigenschaften entstehen, da materialspezifische Wellenlängen der Resonanzfrequenz die Moleküle der Materie zum Schwingen bringen. Der Teil der nicht absorbierten Wellenlängen wird reflektiert und kann detektiert werden. Die Auswertung dieser Signale gibt Aufschluss über die Art des Materials. [15 S. 3]

Der Transport des Sortierguts erfolgt mittels Förderband, welches das Material an der Sensoreinheit vorbei führt. Es kommt zu einer Auswertung der Daten in Echtzeit sowie zur Weitergabe der Informationen an die Druckluftventile. Diese dienen dazu, die detektierten Einheiten aus dem Materialstrom auszublasen und sie so zu sortieren (siehe Abbildung 12). Am Standort ThermoTeam findet ein zweistufiger Nahinfrarot-Sortierprozess statt. Eine, um den PET und PVC Mix aus dem Produktstrom auszuschleusen und eine weitere, um diesen Mix in die Fraktionen PVC und PET aufzuteilen.



Abbildung 12: Nahinfrarotsortierung [16]

3 Planung der Versuche und der Probenahme

Dieser Abschnitt befasst sich mit der für diese Arbeit essentiellen Probenahme und die dazugehörigen Grundlagen und Verfahren.

3.1 Rechtliche Bestimmungen für Probenahmen

Um reproduzierbare und vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, bedarf es eines Regelwerks, welches von den Probenehmern eingehalten werden muss.

Die in den nächsten Kapiteln angeführten Verordnungen und Normen betreffen feste Sekundärbrennstoffe und sind deshalb für die Materialien, welche in dieser Masterarbeit behandelt werden, anzuwenden.

3.1.1 Abfallverbrennungsverordnung (AVV)

Die Abfallverbrennungsverordnung basiert auf Abfall-, Gewerbe- und Wasserrecht sowie dem Emissionsschutzgesetz für Kesselanlagen. Sie gilt für gefährliche und nicht gefährliche Abfälle, die in Verbrennungsanlagen oder Mitverbrennungsanlagen verbrannt werden. [1, S. 1]

Die Ziele dieses Gesetzestexts lauten wie folgt: [1, S. 1f.]

- Schutz des Menschen und der Umwelt vor schädlichen Einflüssen, die durch die Verbrennung oder Mitverbrennung von Abfällen entstehen können,
- der Betrieb von Verbrennungs- und Mitverbrennungsanlagen ist so zu gestalten, dass Emissionen möglichst gering ausfallen,
- Energie soll effizient eingesetzt und verwendet werden und
- im Fall von Mitverbrennungsanlagen ist die Verlagerung von Schadstoffen in das Produkt zu vermeiden.

In Anlage 8 der Abfallverbrennungsverordnung werden die Vorgaben für die Abfälle bei der Verbrennung in Mitverbrennungsanlagen dargestellt. Unter anderem werden hier auch die Probenahmenvorschriften genannt, die notwendig sind, um repräsentative Ergebnisse zu erhalten. Die Vorschriften und der dadurch entstehende Probenahmeplan werden im Kapitel 3.2 Probenahmeplan eingehend besprochen. [1, S. 33ff.]

3.1.2 ÖNORM EN 15442 Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Probenahme

In der ÖNORM EN 15442 werden Verfahren zu Entnahme von Proben von festen Sekundärbrennstoffen geregelt. Es werden sowohl manuelle als auch mechanische Verfahren behandelt. [18, S. 8]

Besonders essentiell für diese Arbeit sind die Informationen zur Berechnung des Mindestprobenumfangs und die Verfahren zur Probenahme von einem laufenden Förderband.

3.2 Probenahmeplanung

Die Abfallverbrennungsverordnung verweist bezüglich der Probenahmeplanung auf die ÖNORM EN 15442. Laut dieser muss die Planung wie folgt ablaufen [18, S. 14ff.]

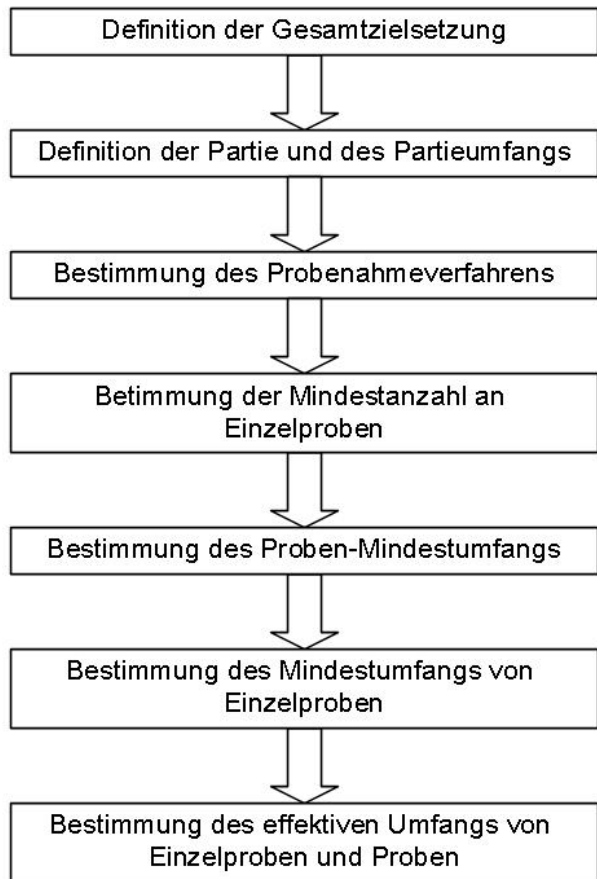


Abbildung 13: Erforderliche Elemente zur Aufstellung eines Probenahmeplans [18, S. 14]

3.2.1 Definition der Zielsetzung

Die Proben sollen die Eigenschaften des festen Sekundärbrennstoffes repräsentativ darstellen. Sie sollen dazu dienen, Sieb- und chemische Analysen durchzuführen.

3.2.2 Definition der Partie und des Partieuumfangs

Da es sich in diesem Fall um eine Probenahme aus einem Materialstrom handelt, muss die Partie als Zeitdauer oder als Zeitdauer, in der eine bestimmte Menge an festem Sekundärbrennstoff durch den Materialstrom transportiert wird, definiert werden.

Ist die Jahresproduktion des betrachteten Guts < 40.000 t/a ergibt sich laut Abfallverbrennungsverordnung ein Losumfang von 1.500 t. Dieses Los wird in zehn Teilmengen unterteilt, wobei von diesen zehn fünf für eine Untersuchung herangezogen werden. Aus diesen Teilmengen sind zwei qualifizierte Stichproben, nachfolgend als QSTP bezeichnet, zu entnehmen. Eine QSTP besteht aus 10 Einzelproben. [1, S. 38ff.]

3.2.3 Bestimmung des Probenahmeverfahrens

Das Verfahren der Probenentnahme muss repräsentativ sein, deshalb ist es von Vorteil, wenn das Material von einem bewegten Transportmittel entnommen wird. Zur Entnahme von einem Förderband sind mehrere Verfahren geeignet und gelten als ausreichend repräsentativ. Sollten diese Verfahren nicht anwendbar sein, kann ein anderes angewandt werden. [18 S. 15]

3.2.4 Bestimmung der Anzahl der Einzelproben

Die folgende Auflistung und Zusammenfassung der Proben zeigen die Anzahl der Einzelproben.

Tabelle 3: Anzahl der Einzelproben

Anzahl der Einzelproben pro QSTP	Anzahl der QSTP pro Probenahmetag	Anzahl der Einzelproben pro Probenahmetag	Gesamtanzahl QSTP (5 Tage)	Gesamtanzahl der Einzelproben
10	2	20	10	200

3.2.5 Bestimmung des Proben-Mindestumfangs

Die Berechnung der Mindestmenge der Proben wird in der ÖNORM 15442 genau geregelt. Nach jeder Probenahme werden die nominelle Siebgröße (d_{95}) und ($d_{0,5}$) mittels Siebanalyse neu ermittelt und dadurch die Menge erneut angepasst, um den tatsächlichen Gegebenheiten zu entsprechen.

Zur Berechnung der Mindestmenge einer qualifizierten Stichprobe ist nach ÖNORM 15442 folgende Gleichung zu verwenden:

$$m_{QSTP} = \frac{\pi}{6} * d_{95}^3 * s * \lambda * g * \frac{(1-p)}{(C_v)^2 * p} \quad (1) [18, S. 35]$$

Um diese Gleichung lösen zu können, müssen bestimmte Parameter bekannt sein. Die Bedeutung selbiger wird nachfolgend beschrieben.

Parameter	Bedeutung	Einheit
m_m	Masse des Proben-Mindestumfangs	kg
d_{95}	Nominelle Siebgröße eines Partikels (Massenanteil von 95% der Partikel ist kleiner als d_{95})	mm
s	Formfaktor, Form der Partikel	mm^3/mm^3
λ	Teilchendichte	g/mm^3
g	Verteilungsfaktor, berichtigt die Verteilung der Partikelgröße	dimensionslos
p	Anteil von Partikeln mit einer bestimmten Eigenschaft	dimensionslos
c_v	Variationskoeffizient	dimensionslos

Exemplarische Berechnung der Mindestmenge einer qualifizierten Stichprobe:

Die nachfolgende Tabelle 4 stellt die dafür notwendigen Werte zu Verfügung.

Tabelle 4: Werte der exemplarischen Berechnung

Parameter	Wert
d_{95}	30 mm
s	0,1 mm ³ /mm ³
λ_p	0,001 g/mm ³
g	0,25
p	0,1
c_v	0,1

$$m_{QSTP} = \frac{\pi}{6} * 30^3 * 0,1 * 0,001 * 0,25 * \frac{(1-0,1)}{(0,1)^2 * 0,1} = 318,09g$$

3.2.6 Bestimmung der Mindestmenge einer Einzelprobe

Die in dem vorigen Kapitel berechnete qualifizierte Stichprobe besteht aus zehn Einzelproben. Der Mindestumfang einer solchen Einzelprobe muss ebenfalls nach bestimmten Vorgaben errechnet werden. Die nachfolgende Formel beschreibt diesen Vorgang.

Zur Berechnung der Mindestmenge einer Einzelprobe:

$$m(d_{95} > 3mm) = 2,7 * 10^{-8} * d_{95}^3 * \lambda_s \quad (2) [18, S. 45]$$

Parameter	Bedeutung	Einheit
d_{95}	Nominelle Siebgröße eines Partikels (Massenanteil von 95% der Partikel ist kleiner als d_{95})	mm
λ_s	Schüttdichte	kg/mm ³

Exemplarische Berechnung der Mindestmenge einer Stichprobe:

In der nachgestellten Tabelle 5 stellt sind die notwendigen Werte angeführt.

Tabelle 5: Werte zur Berechnung der Mindestmenge einer Stichprobe

Parameter	Wert
d_{95}	30 mm
λ_s	225 kg/m ³

$$m(d_{95} > 3mm) = 2,7 * 10^{-8} * 30^3 * 225 = 0,164g$$

3.2.7 Bestimmung des effektiven Probenumfangs

Laut der ÖNORM EN 15442 muss der effektive Probenumfang folgende Kriterien erfüllen:

- der effektive Umfang muss \geq sein als der Proben-Mindestumfang;
- er muss hinreichend groß sein, um mindestens gleich der Mindestanzahl der Einzelproben multipliziert mit dem Mindestumfang der Einzelproben zu sein;
- der effektive Probenumfang muss ausreichend Material für die Analysen stellen.

Keiner der angeführten Punkte kann ausreichend erfüllt werden. Punkt 2 wird exemplarisch

$$m(d_{95} > 3mm) * n_{\text{Einzelproben}} = 0,164g * 10 = 1,64g$$

Der berechnete Wert entspricht nicht dem verlangten Proben-Mindestumfang und muss deshalb erhöht werden.

Um ausreichend Material für die nachfolgenden chemischen und Siebanalysen zu erhalten sowie den rechtlichen Vorgaben zu entsprechen, werden bei jeder Einzelprobe mindestens 500 g entnommen. Dadurch steigert sich die Masse der qualifizierten Stichprobe auf 5 kg und können alle o.a. Vorgaben eingehalten werden.

3.3 Planung des Großversuchs

Neben den rechtlich vorgeschrieben Entnahmemengen, wurde außerdem entschieden, ergänzend einen Großversuch durchzuführen. Dieser soll in großem Maßstab zusätzliche Aussagen über die Siebanalysen geben.

Zu diesem Zweck soll eine Entnahme zwischen 400 und 500 kg des Ersatzbrennstoffs in bestimmten Chargen über einen gewissen Zeitraum und eine Fraktionierung vor Ort mit einer von Firma Saubermacher Dienstleistungs AG zur Verfügung gestellten Siebmaschine erfolgen.

Jede Stunde soll eine Entnahme von in etwa 50 - 60 kg Material durch diese Entnahmestelle erfolgen, bis die vorgegebene Menge erreicht wird. Diese Entnahmestelle findet auch bei den Einzelproben Verwendung.

Die Grobfraction des gesiebten Materials wird anschließend wieder in die Anlage eingebracht, allerdings ohne den Betrieb der einzelnen Separatoren, um die Fraktion nicht weiter zu verändern. Um die Grobfraction weiter zu zerkleinern, ist nur das Zerkleinerungsaggregat weiterhin in Betrieb. Aus der gewonnenen Fraktion werden fünf Proben zu 10 kg entnommen.

Für ein besseres Verständnis ist anschließend der geplante Verfahrensablauf der Kleinversuche und des Großversuchs grafisch dargestellt. (vgl. Abbildung 14)

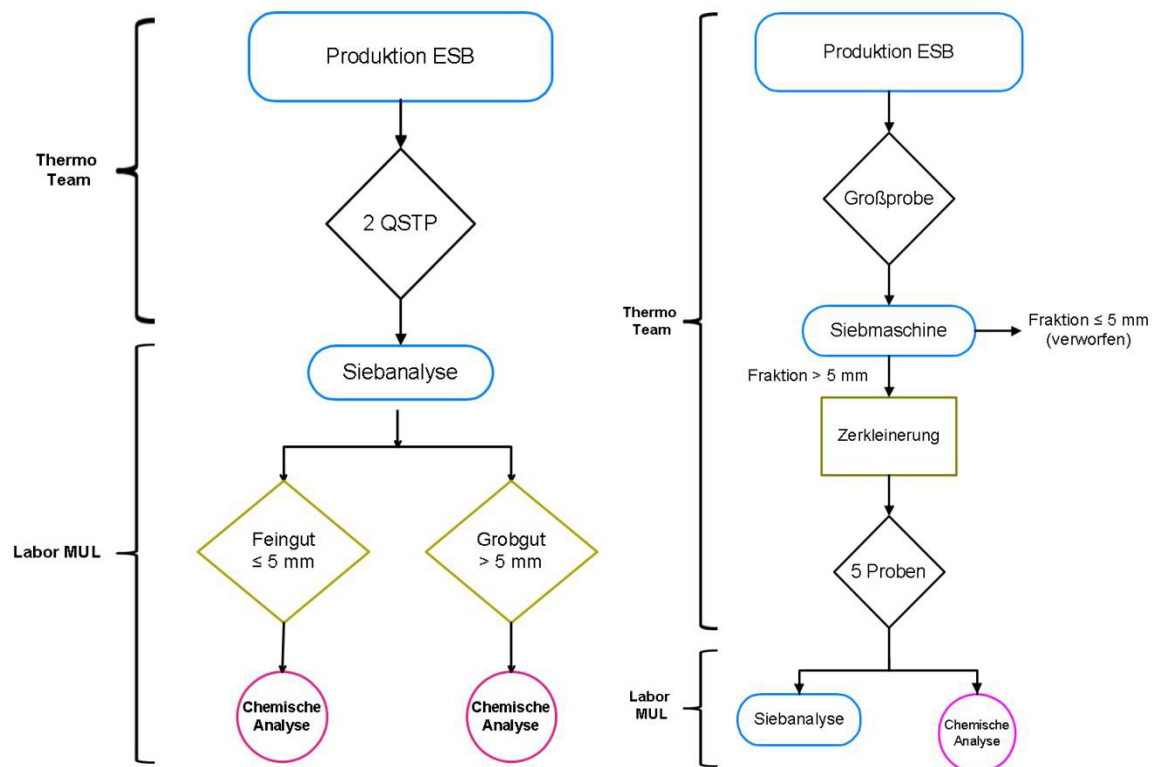


Abbildung 14: Schemata Kleinversuch (links) und Großversuch (rechts)

4 Versuchsdurchführung

Unter der Berücksichtigung der Erkenntnisse aus dem letzten Kapitel ergibt sich für die Versuchsdurchführung am Standort ThermoTeam folgendes Verfahren.

Die Abgabe des betrachteten Ersatzbrennstoffs an einen einzelnen Abnehmer liegt unter 40.000 t/a. Daraus ergibt sich laut Abfallverbrennungsordnung ein Losumfang von 1.500 t. Dieses Los wird in zehn Teilmengen unterteilt, wobei von diesen fünf für eine Untersuchung herangezogen werden. Aus diesen Teilmengen sind zwei qualifizierte Stichproben zu entnehmen. Es werden vom Betreiber 150 t Einsatzmaterial zur Verfügung gestellt und in 10 Stunden verarbeitet, das ergibt ein Durchsatz von 15 t/h. Daraus ergibt sich eine Entnahme von zwei Einzelproben pro Stunde, die anschließend nach 10 h Betrieb zu zwei QSTP zusammengeführt werden. Die Untersuchung umfasst fünf Teilproben, aus welchen sich fünf Probenahmetage ergeben.

Die Anzahl der Einzelproben und der qualifizierten Stichproben für die Kleinversuche, sowie die erforderlichen Massen sind in der folgenden Tabelle 6 ersichtlich.

Tabelle 6: Zusammenfassung des Probenumfangs der Kleinversuche

Anzahl der Einzelproben pro QSTP	Anzahl der QSTP pro Probenahmetag	Anzahl der Einzelproben pro Probenahmetag
10	2	20
Masse der Einzelproben	Masse der QSTP	Masse des Probenumfangs pro Versuchstag
0,5 kg	5 kg	10 kg

Im Zuge des vierten Versuchstags erfolgte parallel zu den Kleinversuchen auch der Großversuch. In der unten angeführten Tabelle 7 kann die Anzahl der Einzelproben und deren Masse ausgelesen werden.

Tabelle 7: Zusammenfassung des Probenumfangs des Großversuchs

Anzahl der Einzelproben für Großprobe	Anzahl der Großprobe
7 - 9	1
Masse der Einzelproben	Masse der Großprobe
50 - 60 kg	400 - 500 kg

Da eine Aufbereitung der Großprobe vor Ort durch eine Siebung und eine anschließende weitere Zerkleinerung in der Anlage erfolgte, ist das daraus gewonnene Material erneut zu beproben. In Tabelle 8 ist das Vorgehen bezüglich Anzahl und Masse der Proben aufgelistet.

Tabelle 8: Zusammenfassung des Probenumfangs des zerkleinerten Materials

Anzahl der Proben des zerkleinerten Materials	Masse der Proben des zerkleinerten Materials	Masse des Probenumfangs pro Versuchstag
5	10 kg	50 kg

Das gewählte Probenahmeverfahren war die Entnahme aus einem Förderband, welche das Produkt in den Lagerbunker transportiert. In diese Fördereinrichtung ist eine pneumatisch gesteuerte Entnahmevorrichtung, siehe Abbildung 15, eingebaut, aus der die Probe entnommen wurde.



Abbildung 15: Automatische Entnahmevorrichtung am Standort ThermoTeam

Mit Hilfe der auf der Abbildung erkennbaren Waage und des Kunststoffkübels wird die erforderliche Menge der Einzelprobe bestimmt.

Die Proben wurden an fünf Versuchstage genommen, die Tabelle 9 entnommen werden können.

Tabelle 9: Probenahmetage

Probenahme	Datum	Tätigkeit
Kleinversuch 1	29.06.2016	Probenahme KV, Massenbestimmung, Transport
Kleinversuch 2	05.07.2016	Probenahme KV, Massenbestimmung, Transport
Kleinversuch 3	13.07.2016	Probenahme KV, Massenbestimmung, Transport
Kleinversuch 4	27.07.2016	Probenahme KV Massenbestimmung, Transport
Kleinversuch 5	11.08.2016	Probenahme KV, Massenbestimmung, Transport
Großversuch	27.07.2016	Probenahme GV, Massenbestimmung, Transport

Nach Möglichkeit wurde an den Versuchstagen darauf geachtet, vergleichbares Material zu verwenden. Die folgenden Grafiken zeigen exemplarisch das eingesetzte Material (siehe Abbildung 16) und selbiges in der Detailansicht (siehe Abbildung 17).



Abbildung 16: Aufgabematerial Versuch 2



Abbildung 17: Detailansicht Aufgabematerial Versuch 2

Neben den Proben wurden auch die Mengen der ausgeschleusten Wert- und Störstoffe erfasst und ausgewertet. Ebenso ist das Eingangsmaterial definiert und kann so in die Bilanzierung mit aufgenommen werden. Um die Mengen so genau wie möglich erfassen zu können, wurden vor jedem Versuch die Auffangbehälter (PET, PVC) und Wert/Störstoffboxen (NE, FE und Inertstoff) entleert.

In den weiteren Kapiteln wird auf die einzelnen Probenahmetage genauer eingegangen und der Ablauf geschildert.

4.1 Probenahme Kleinversuch 1

Die erste repräsentative Probennahme fand am 29.06.2016 statt. Als Aufgabematerial wurden von der Firma ThermoTeam vorsortierte Leichtverpackungen zur Verfügung gestellt. Die genaue Menge und Herkunft ist zu Tabelle 9 entnehmen.

Nach dem Durchlaufen der einzelnen Verfahrensschritte erfolgte eine Entnahme von 20 Einzelproben über die Probenahmeschleuse, die zu zwei QSTP zusammengeführt

wurden. Die Probenahme und vor allem die Intervalle, in denen die Proben genommen werden, sind vom reibungslosen Ablauf der Anlage abhängig.

So war es zeitweise nicht möglich, die berechneten 60 Minuten Intervalle einzuhalten, da es in der Produktionsanlagen zu Stillständen oder verpflichteten Wartungsarbeiten gekommen ist. In diesem Fall war es notwendig, die Intervalle auf den verringerten Durchsatz und die Stillstandzeiten weiter anzupassen, um die Repräsentativität zu gewährleisten.

Während des ersten Versuchstages kam es immer wieder zu Verzögerungen und dadurch zu Angleichungen der Intervalle.

Neben den eigentlichen Probenahmen werden auch Daten erhoben, welche die Zusammensetzung des Eingangsmaterials repräsentieren. Während des Aufbereitungsprozesses werden Wert- bzw. Störstoffe ausgeschleust und mengenmäßig erfasst. Die Massenbilanz des ersten Versuchs zu diesen Daten sind in Tabelle 9 und Abbildung 18 zusammengefasst.

Tabelle 10: Kleinversuch 1 - Massenbilanz

Aufgabe						
ARA vorsortiert				144.940 kg		
Austrag						
Inert-Fraktion	NE-Fraktion	FE-Fraktion	PVC-Fraktion	PET-Fraktion	Verluste	EBS-Fraktion ¹
574,4 kg	80,2 kg	2.180 kg	1.540 kg	3.400 kg	3.043,7 kg	134.121,7 kg
0,4%	0,1%	1,5%	1,1%	2,3%	2,1%	92,5%

Neben dem Ersatzbrennstoff zählt die Fraktion der Verluste zu den mengenmäßig am meisten ins Gewicht fallenden, gefolgt von Polyethylenterephthalat (PET) und der FE-Fraktion. Die Verluste sind mit 2,1% ein Annahmewert und beziehen sich auf Erfahrungswerte des Anlagenbetreibers.

Die Verluste entstehen durch:

- Material, das in den Maschinen zurückbleibt,
- Wasserdampf, der bei der Aufbereitung des feuchten Aufgabematerials entsteht und
- der Staubbildung in der Halle.

¹ EBS-Fraktion wurde berechnet. Verluste durch die Aufbereitung wurden berücksichtigt.

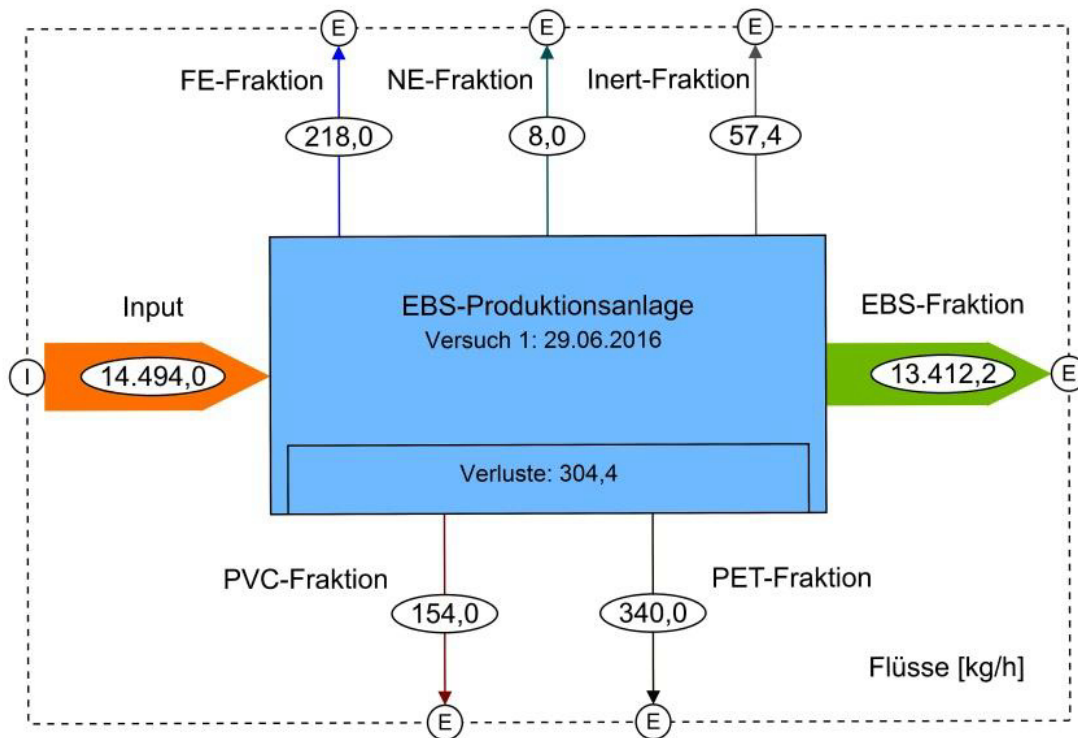


Abbildung 18: Kleinversuch 1 - Massenflüsse (in kg/h)

4.2 Probenahme Kleinversuch 2

Am 05.07.2016 fand die zweite Probenahme statt. Aufgrund eines technischen Gebrechens an der Druckluftleitung, welches zuerst behoben werden musste.

Das Aufgabematerial waren vorsortierte Kunststoffleichtverpackungen in Ballenform. Die exakte Aufgabemenge kann aus Tabelle 11 entnommen werden.

Abermals wurden jeweils zwei Einzelproben pro Stunde zehnmals entnommen und zu je zwei QSTP zusammengeführt. Es erfolgte eine Anpassung und Änderung der Intervallzeiten zwischen den Probenahmen an die Störungshäufigkeiten.

Auch am zweiten Versuchstag fand eine Erfassung der neben den qualifizierten Stichproben anfallenden Materialströme in der Anlage statt, die in den nächsten Darstellungen (siehe Tabelle 11 und Abbildung 19) beschrieben sind.

Tabelle 11: Kleinversuch 2 - Massenbilanz

Aufgabe						
ARA vorsortiert				150.820 kg		
Austrag						
Inert-Fraktion	NE-Fraktion	FE-Fraktion	PVC-Fraktion	PET-Fraktion	Verluste	EBS-Fraktion ¹
1.392,0 kg	168,0 kg	2.960,0 kg	1.220,0 kg	2.300,0 kg	3.167,2 kg	139.612,8 kg
0,9%	0,1%	2,0%	0,8%	1,5%	2,1%	92,6%

Der produzierte Ersatzbrennstoff und die Verluste sind mengenmäßig die größte Fraktion. Bei der Ausschleusung der Wert- und Störstoffe machen die Eisen und PET Fraktionen den nächsthöchsten Prozentsatz aus, wobei beide bei zwei Prozent liegen.

Die Abbildung 19 zeigt die Massenströme in Kilogramm pro Stunde auf, die während der Produktion der Ersatzbrennstoffe bei KV 2 anfallen.

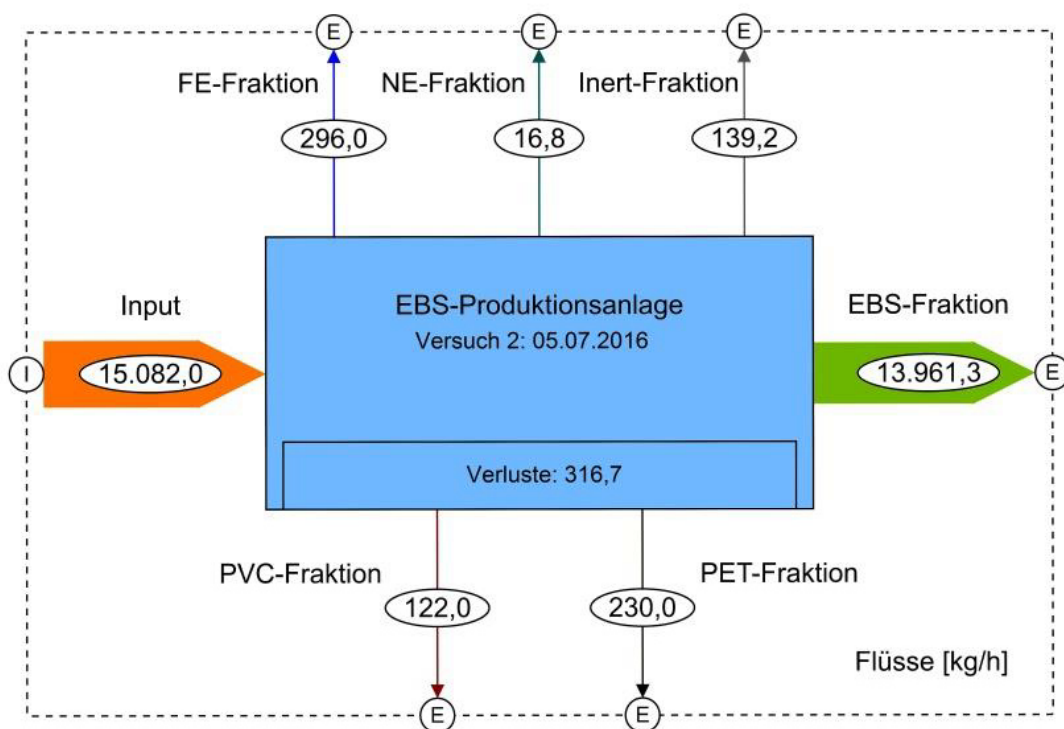


Abbildung 19: Kleinversuch 2 - Massenflüsse (in kg/h)

¹ EBS-Fraktion wurde berechnet. Verluste durch die Aufbereitung wurden berücksichtigt.

4.3 Probenahme Kleinversuch 3

Am 13.07.2016 fand der dritte Versuchstag statt. Auch hier bestand die Aufgabe in der Herstellung zwei qualifizierter Stichproben und der Erfassung der Wert- und Störstoffströme aus der Ersatzbrennstoffproduktion.

Kunststoffleichtverpackungen, wiederum durch die Altstoff Recycling Austria AG gesammelt und vorsortiert wurden, bildeten das Ausgangsmaterial für diesen Versuch. Die aufgeführte Menge kann aus Tabelle 12 abgelesen werden.

Wie auch schon in den vorangegangenen Versuchen waren die Wert- und Störstoffboxen vor Versuchsbeginn entleert worden und so konnten die Mengenströme nachverfolgt werden. In Tabelle 12 und Abbildung 20 können die Mengen und die prozentuale Verteilung der einzelnen Fraktionen für KV 3 entnommen werden.

Tabelle 12: Kleinversuch 3 - Massenbilanz

Aufgabe						
ARA vorsortiert				166.120 kg		
Austrag						
Inert-Fraktion	NE-Fraktion	FE-Fraktion	PVC-Fraktion	PET-Fraktion	Verluste	EBS-Fraktion ¹
909,6 kg	221,8 kg	2.720,0 kg	1.700,0 kg	3.880,0 kg	3.488,5 kg	153.200,1 kg
0,5%	0,1%	1,6%	1,0%	2,3%	2,1%	92,2%

Neben der Produktion des Ersatzbrennstoffs und den Verlusten bestimmte an diesem Versuchstag die PET-Fraktion das Bild der Massenströme. Mit beinahe 100 kg wurde um 0,7% mehr PET als Eisen pro Stunde ausgeschleust. Diesen Sachverhalt verdeutlicht die unten angeführte Abbildung 20.

¹ EBS-Fraktion wurde berechnet. Verluste durch die Aufbereitung wurden berücksichtigt.

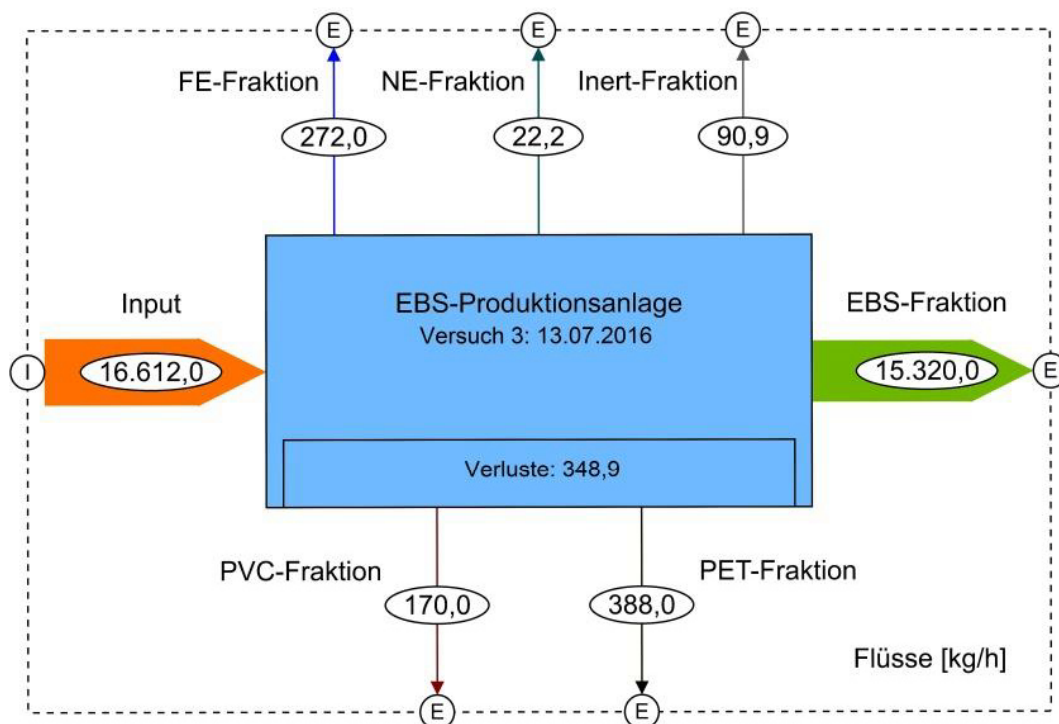


Abbildung 20: Kleinversuch 3 - Massenflüsse (in kg/h)

4.4 Probenahme Kleinversuch 4

Am vierten Versuchstag wurde neben Kleinversuch 4 auch der Großversuch durchgeführt. Koordinativ war dies eine größere Herausforderung, die aber dank der hervorragenden Unterstützung des Personals vor Ort bewältigt werden konnte. In diesem Unterkapitel soll nur auf den Kleinversuch eingegangen werden. Die Probenahme des Großversuchs wird in Kapitel 4.7 separat beschrieben.

Das Ausgangsmaterial an diesem Probenstag waren wiederum Kunststoffballen, die aus vorsortierten Kunststoffleichtverpackungen bestanden. Die Inputmenge für KV 4 waren 152.300 kg, auszulesen aus Tabelle 13.

Auch an diesem Tag sind von der Belegschaft die Ströme der Wert- und Störstoffe aufgenommen worden. Die schriftlichen und grafischen Auswertungen sind nachfolgend in Tabelle 13 und Abbildung 21 zu sehen.

Tabelle 13: Kleinversuch 4 - Massenbilanz

Aufgabe						
ARA vorsortiert				152.300 kg		
Austrag						
Inert-Fraktion	NE-Fraktion	FE-Fraktion	PVC-Fraktion	PET-Fraktion	Verluste	EBS-Fraktion ¹
576,0 kg	133,8 kg	2.500,0 kg	1.500,0 kg	2.720,0 kg	3.198,3 kg	141.671,9 kg
0,4%	0,1%	1,6%	1,0%	1,8%	2,1%	93,0%

Bei der Aufbereitung dieses Materials waren die mengenmäßig größten Fraktionen PET und Eisen, wobei beide mit annähernd gleich großen Anteilen vertreten waren. Wieder wurden die Verluste durch Wasserdampf, Staub und Material, das in den Maschinen zurückgehalten wurde, mit 2,1% angenommen.

Die nachfolgende zeigt die Massenströme in Kilogramm pro Stunde.

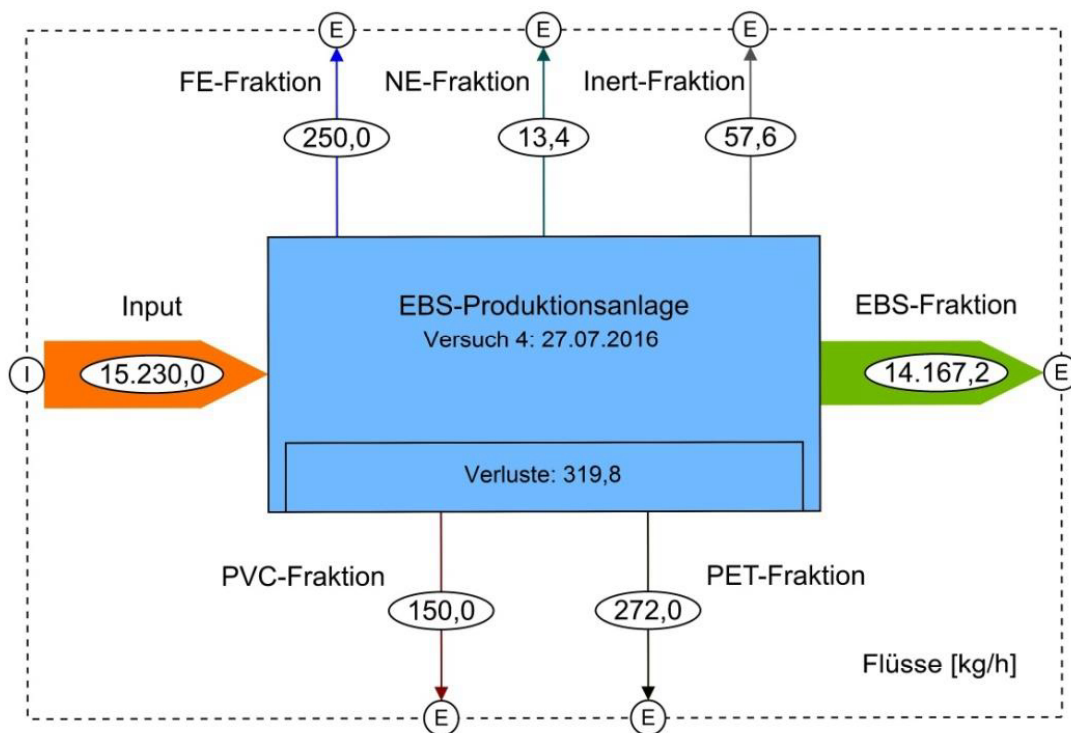


Abbildung 21: Kleinversuch 4 bzw. Großversuch - Massenflüsse (in kg/h)

¹ EBS-Fraktion wurde berechnet. Verluste durch die Aufbereitung wurden berücksichtigt.

4.5 Probennahme Kleinversuch 5

Der letzte Versuch Untersuchungen fand am 11.08.2016 statt. An diesem Tag wurden nicht wie gewöhnlich zwei QSTP genommen sondern vier. Der Grund dafür lag in der Interpretation der Daten aus dem Großversuch und dem Vergleich mit den Kleinversuchen. Die genaue Erörterung des Sachverhalts findet im Kapitel 5.3.1 „Interpretation der Siebanalysen“ statt.

Das Inputmaterial am fünften Versuchstag bestand aus vorsortierten Leichtverpackungen aus Kunststoff. Die Aufgabemenge ist Tabelle 14 zu entnehmen.

Da vier QSTP entnommen worden sind, steigerte sich der Probenumfang auf insgesamt 20 kg. Aus Gründen, die in Kapitel 5.3.1 eingehender diskutiert werden, unterschied sich die Probenahme der zusätzlichen qualifizierten Stichproben ausschließlich in der Dauer, die die Probenahmeschleuse geöffnet wurde. Diese wurde von nur wenigen Sekunden auf mindestens 30 Sekunden verlängert.

Neben dem Kleinversuch wurden, wie bisher, auch die Mengen der Wert- und Störstoffe festgehalten. Die unten angeführte Tabelle 14 und Abbildung 22 fassen die erhaltenen Daten zusammen.

Tabelle 14: Kleinversuch 5 - Massenbilanz

Aufgabe						
ARA vorsortiert				149.580 kg		
Austrag						
Inert-Fraktion	NE-Fraktion	FE-Fraktion	PVC-Fraktion	PET-Fraktion	Verluste	EBS-Fraktion ¹
490,5 kg	167,4 kg	2.470,0 kg	1.480,0 kg	3.120,0 kg	3.141,2 kg	138.710,9 kg
0,3%	0,1%	1,7%	1,0%	2,1%	2,1%	92,7%

Auch an diesem Tag sind keine starken Abweichungen zu den anderen Versuchen zu erkennen. Die Fraktionen PET und Eisen sind mengenmäßig am stärksten vertreten. Die Verluste wurden mit 2,1% angenommen.

Die folgende Abbildung 22 zeigt die stündlich durchgesetzten und ausgeschleusten Mengen des Eingangs- und Ausgangsmaterials.

¹ EBS-Fraktion wurde berechnet. Verluste durch die Aufbereitung wurden berücksichtigt.

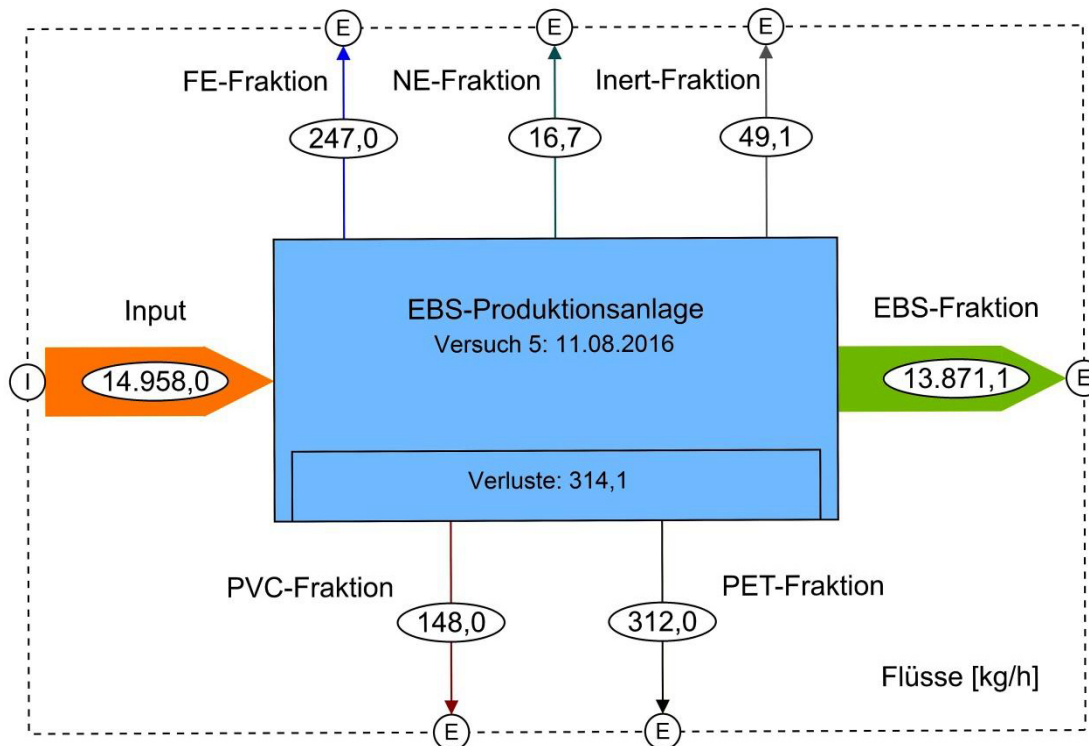


Abbildung 22: Kleinversuch 5 - Massenflüsse (in kg/h)

4.6 Probenahme Kleinversuch 6

Der sechste Probenahmetag (02.11.2016) diente allein der Herstellung einer großen Menge an QSTP, um die Verteilung der Masse zwischen Fein- (≤ 5 mm) und Grobfraction bzw. EBS PREMIUM Quality neu (> 5 mm) zu bestätigen. Die Entnahme der qualifizierten Stichproben folgte der Verfahrensweise der sonstigen Kleinversuche, mit dem Unterschied, dass die Schleusenklappe länger in der offenen Stellung belassen wurde, bevor eine Entnahme der Probe aus dem herabfallenden Materialstrom erfolgte.

Die Mengen der Wert- und Störstoffe wurden an diesem Versuchstag nicht bestimmt, da es zu einer Verschiebung der Startzeit des Versuchs kam und somit ein Leeren der Boxen nicht möglich war. Das Aufgabematerial (ARA vorsortiert) unterschied sich nicht wesentlich von den anderen Versuchen und umfasste 147.980 kg.

Im Laufe dieses Versuchstags sind 4 QSTP hergestellt worden, die anschließend ausschließlich einer Siebanalyse unterzogen worden sind.

4.7 Probenahme Großversuch

Ziel des Großversuchs war es, eine Probe mit einer Größe von ca. 500 kg zu erhalten. Eine genaue Messung der Entnahmemenge war bei diesem Umfang nicht durchführbar, es fand daher eine Entnahme von ähnlich großen Einzelproben im Abstand von ungefähr einer Stunde statt. Die Einzelproben des Großversuchs wurden durch dieselbe Schleuse entnommen, wie die Einzelproben für die Kleinversuche.

Der Großversuch dient nicht dem Vergleich mit den Kleinversuchen, sondern soll Aufschluss über eine mögliche Prozessveränderung geben. Ein Vergleich wäre nicht zulässig, da eine Erstellung der Proben auf andere Weise erfolgte (Abtrennung der Feinfraktion, zusätzlicher Zerkleinerungsschritt). Die Überlegung ist, eine zusätzliche Abtrennung der Feinfraktion (Siebung ≤ 5 mm) sowie einen weiteren Zerkleinerungsschritt zu installieren. Diese Maßnahmen sollen die Qualität des Ersatzbrennstoffs weiter erhöhen.

Die folgende Abbildung 23 zeigt die Probenahme durch die dafür vorgesehene Schleuse.



Abbildung 23: Probenahme Großversuch

Die Massen der Einzelproben lagen im Durchschnitt zwischen 50 und 60 kg. Die genauen Werte sind in Tabelle 15 angeführt.

Tabelle 15: Großversuch - Entnahmemengen Einzelproben der Großprobe

Großprobe		
Einzelprobe	Entnahmezeit	Entnahmemenge [kg]
1	08:31	55,8
2	09:28	53,0
3	10:23	63,7
4	11:10	48,8
5	11:53	49,0
6	12:31	57,2
7	13:01	64,4
8	13:35	45,2
	Summe:	437,1

Eine weitere Aufgabe an diesem Tag war es, die Großprobe mit einer durch die Firma Saubermacher Dienstleistungs AG zur Verfügung gestellten Siebmaschine vor Ort aufzubereiten. Diese trennte das Material in eine Grob- und Feinfraktion (vgl. Abbildung 24), wobei der Trennschnitt bei 5 mm erfolgte. Die Aufgabe in die Siebmaschine erfolgte über einen Gabelstapler mit der Unterstützung des Personals (siehe Abbildung 25).



Abbildung 24: Grobfraktion (links) Feinfraktion (rechts)



Abbildung 25: Aufgabe des beprobten Materials in Siebmaschine

Der Zweck dieser Aufbereitung bestand darin, Feingut (≤ 5 mm) von Grobgut (> 5 mm) zu trennen, sowie dieses anschließend erneut in die Anlage aufzugeben und zu zerkleinern. Folgende Aufteilung der Massen zwischen den beiden Fraktionen war zu beobachten (vgl. Abbildung 26).

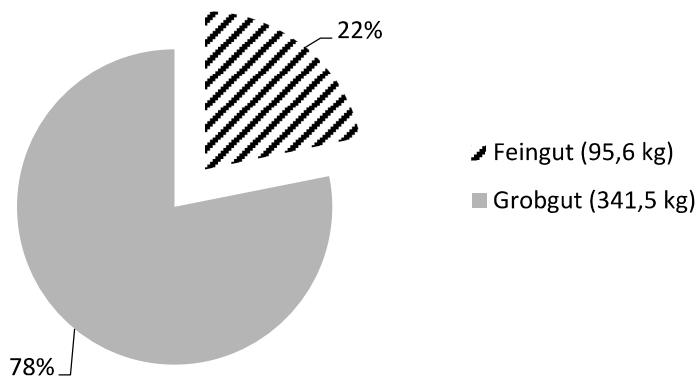


Abbildung 26: Großversuch - Massenverteilung zwischen Fein- und Grogut

Die Betrachtung des Feingutes stand nicht im Fokus, weshalb dieses verworfen wurde. Beim zweiten Durchlauf des Materials wurden alle Separatoren außer Betrieb genommen, lediglich das Zerkleinerungsaggregat der 3D Linie (d.h. 15 mm Zielgröße) war zugeschaltet. Durch die Zerkleinerung des Materials sollte eine Korngröße < 30 mm erreicht werden. Eine Entnahme von fünf Proben zu je 10 kg fand statt. In Summe waren somit 50 kg Probenmaterial einer chemischen Analyse und einer Siebanalyse zuführbar.

Neben der Herstellung der Proben erfolgte auch die Bestimmung der Schüttdichte des Materials. Dies fand über Gefäße mit definiertem Volumen und der Erfassung des Gewichts der einzelnen Fraktionen statt. Die anschließende Tabelle 16 zeigt die Werte der betrachteten Fraktionen.

Tabelle 16: Großversuch - Schüttdichten der betrachteten Fraktionen

Schüttdichten	
Material	Schüttdichten [kg/m ³]
EBS vor der Siebung	109,4
EBS nach Siebung, Fraktion > 5 mm	94,22
EBS nach Siebung, Fraktion ≤ 5 mm	241,96

5 Analysen und Auswertungen

Dieses Kapitel behandelt die unternommenen Analysen und ihre Ergebnisse. Die entnommenen Proben wurden zwecks einer chemischen Analyse an das Labor des Lehrstuhls für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft übergeben. Die Durchführung der Siebanalysen erfolgte eigenhändig.

5.1 Siebanalysen

Ziel einer Siebanalyse ist es, die Korngrößenverteilung des zu untersuchenden Materials zu bestimmen. Diese Analyse wird mit einer Plansiebmaschine (siehe Abbildung 27) und entsprechenden Siebeinsätzen mit genau festgelegten Maschenweiten durchgeführt. Im Zuge dieser Siebanalysen sind sieben Siebeinsätze mit den Maschenweiten 30, 20, 16, 10, 5, 2 und 1 mm zum Einsatz gekommen, um eine aussagekräftige Siebkurve zu erhalten.



Abbildung 27: Für die Siebanalysen verwendete Plansiebmaschine

Nach der Siebanalyse wird das Material zu zwei Fraktionen zusammengeführt:

- einer Fraktion > 5 mm (Grobfraktion bzw. EBS PREMIUM Quality neu) und
- einer ≤ 5 mm (Feinfraktion).

Sowohl die Fein- als auch die Grobfraktion wurden dem Labor zu weiteren chemischen Untersuchungen übergeben.

5.1.1 Siebanalyse Kleinversuch 1

Die zwei hergestellten QSTP des ersten Versuchstags sind am nächsten Tag der Siebanalyse unterzogen worden. Eine Zusammenführung der beiden Proben hat sich als

sinnvoll erwiesen, da so das Material leichter zu analysieren war. Die gewonnene Korngrößenverteilung ist der nachfolgenden Tabelle 17 zu entnehmen.

Tabelle 17: Kleinversuch 1 - Korngrößenverteilung

Maschenweite [mm]	Masse [g os]	Masse [M-% os]	Akkumulierte Masse [M-% os]	Siebdurchgang [M-% os]
> 30	3,0	0,0%	0,0%	100,0%
> 20	66,0	0,7%	0,7%	99,3%
> 16	133,0	1,4%	2,0%	97,9%
> 10	667,0	6,8%	8,8%	91,1%
> 5	2.281,0	23,3%	32,1%	67,9%
> 2	2.608,0	26,6%	58,7%	41,3%
> 1	1.723,0	17,6%	76,2%	23,7%
< 1	2.327,0	23,7%	100,0%	0,0%
Gesamt	9.808,0	100,0%		

Aus dieser Korngrößenverteilung lässt sich eine Körnungssummenkurve erstellen, die die Verteilung der Korngrößen darstellt (vgl. Abbildung 28).

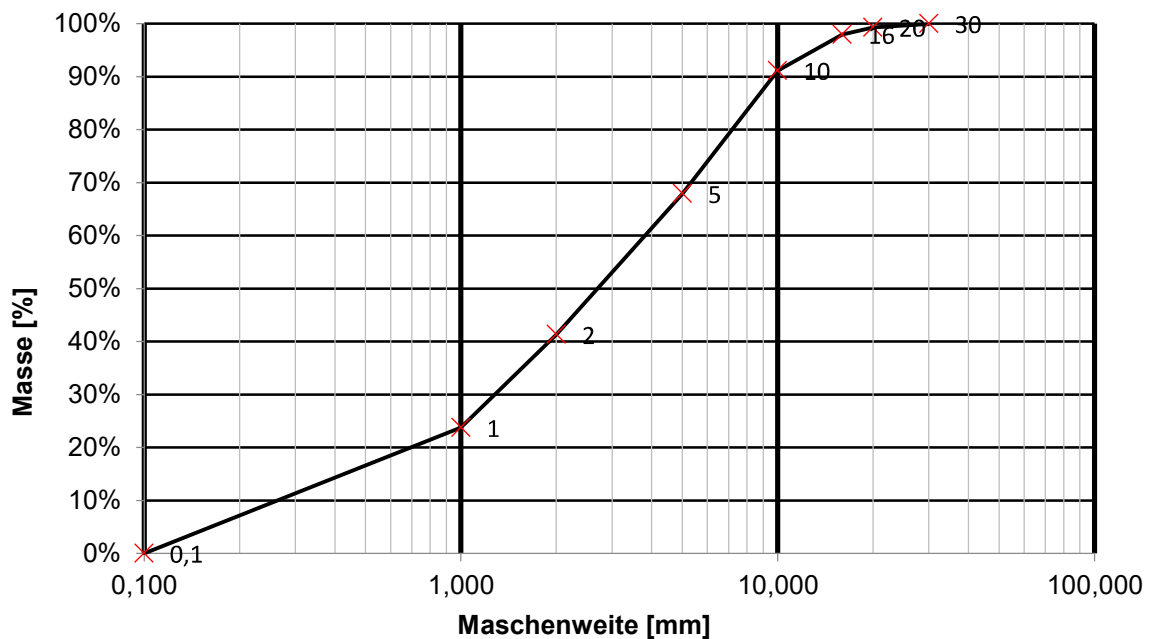


Abbildung 28: Kleinversuch 1 - Körnungssummenkurve

Aus dieser Summenverteilungskurve lassen sich bestimmte Korngrößendurchmesser auslesen, die für die Berechnung der Mindest-Probenahmemenge von Bedeutung sind. In diesem Fall handelt es sich um den Durchmesser d₉₅ und d₀₅. Dies bedeutet, dass ein Massenanteil von 95% der Partikel kleiner ist als ein Partikel mit dem Durchmesser d₉₅. Bei dem Durchmesser d₀₅ verhält es sich ähnlich. Lediglich 5% Massenanteil der Partikel sind kleiner als ein Partikel mit diesen Abmessungen.

Abbildung 29 und Abbildung 30 zeigen exemplarisch für alle Siebanalysen, wie diese Durchmesser grafisch ermittelt werden.

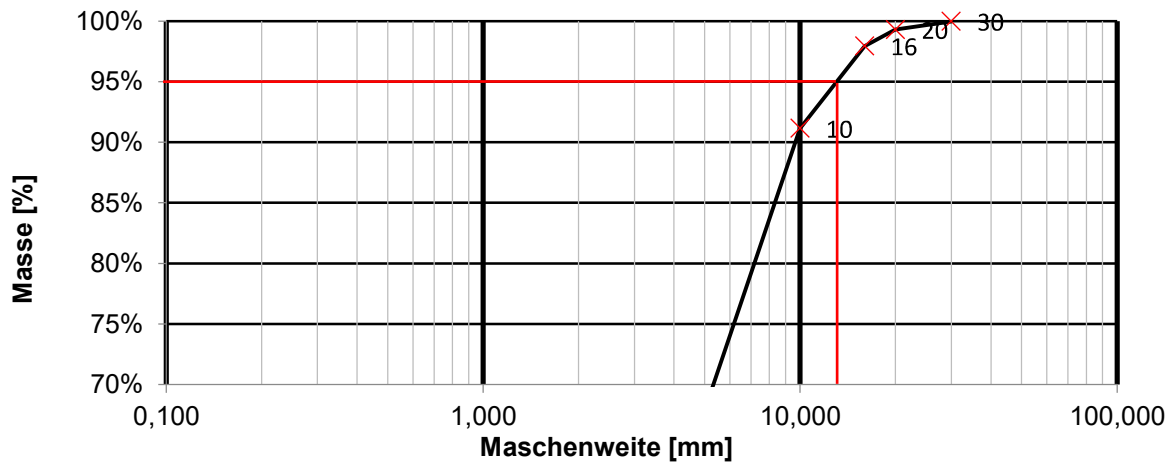


Abbildung 29: Grafische Bestimmung von d_{95}

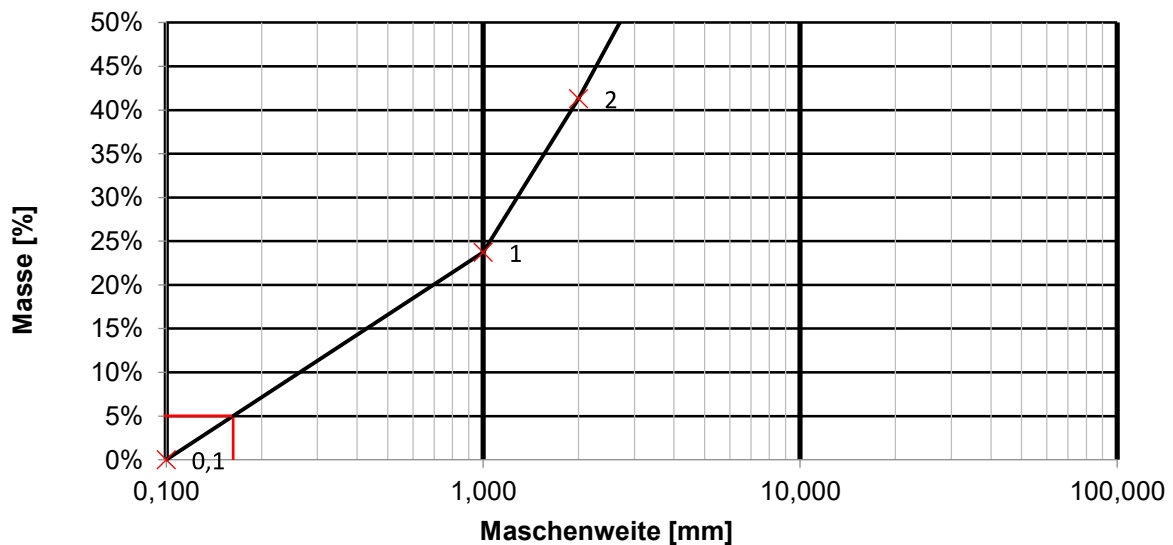


Abbildung 30: Grafische Bestimmung von d_{05}

In diesem Fall ergeben sich für d_{95} 13,75 mm und für d_{05} 0,14 mm. Diese gewonnenen Erkenntnisse sind in eine erneute Berechnung des Proben-Mindestumfangs eingeflossen. Da sich der Probenumfang für den nächsten Versuchstag verkleinert hätte, wurde die ursprüngliche Menge von 500 g beibehalten.

5.1.2 Siebanalyse Kleinversuch 2

Gegenstand der zweiten Siebanalyse waren die qualifizierten Stichproben des Kleinversuchs am 5. Juli 2016. Das Ende der Aufbereitung ergab folgende Korngrößenverteilung (vgl. Tabelle 18).

Tabelle 18: Kleinversuch 2 - Korngrößenverteilung

Maschenweite [mm]	Masse [g _{os}]	Masse [M-% _{os}]	Akkumulierte Masse [M-% _{os}]	Siebdurchgang [M-% _{os}]
> 30	14,0	0,1%	0,1%	99,9%
> 20	122,0	1,2%	1,2%	98,6%
> 16	206,0	2,1%	3,3%	96,5%
> 10	592,0	6,0%	9,3%	90,5%
> 5	2.445,0	24,7%	34,0%	65,8%
> 2	2.596,0	26,3%	60,3%	39,5%
> 1	1.544,0	15,6%	75,9%	23,9%
< 1	2.364,0	23,9%	99,9%	0,0%
Gesamt	9.883,0	100,0%		

Die aufbereiteten Daten zeigen wiederum die Summenverteilung, die in Abbildung 31 zu sehen ist.

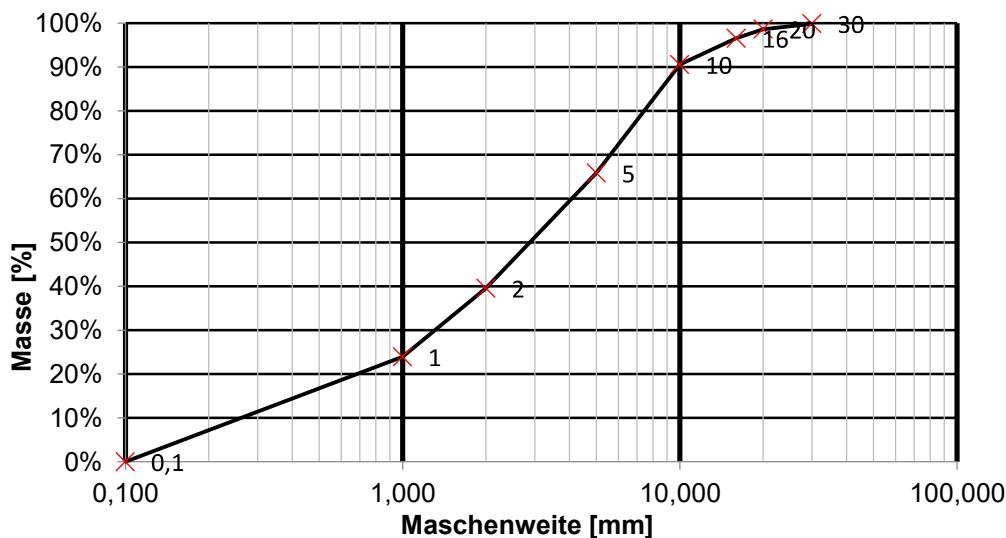


Abbildung 31: Kleinversuch 2 - Körnungssummenkurve

Nach der grafischen Auswertung der Körnungssummenkurve ergeben sich für die relevanten Durchmesser folgende Werte: $d_{95} = 15,24$ mm und $d_{05} = 0,17$ mm. Die erneute Evaluierung des Probenumfangs brachte wiederum eine Reduktion der Menge. Aus diesem Grund wurde an der ursprünglichen Masse festgehalten.

5.1.3 Siebanalyse Kleinversuch 3

Zur Siebanalyse des dritten Kleinversuchs wurden zwei QSTP herangezogen. Durch die Aufbereitung des Materials ergeben sich Daten, die folgende Korngrößenverteilung zeigen (siehe Tabelle 19).

Tabelle 19: Kleinversuch 3 - Korngrößenverteilung

Maschenweite [mm]	Masse [g _{os}]	Masse [M-% _{os}]	Akkumulierte Masse [M-% _{os}]	Siebdurchgang [M-% _{os}]
> 30	0,0	0,0%	0,0%	100,0%
> 20	164,0	1,7%	1,7%	98,3%
> 16	167,0	1,7%	3,3%	96,7%
> 10	1.036,0	10,5%	13,8%	86,2%
> 5	2.338,0	23,6%	37,5%	62,5%
> 2	2.346,0	23,7%	61,2%	38,8%
> 1	1.422,0	14,4%	75,6%	24,4%
< 1	2.416,0	24,4%	100,0%	0,0%
Gesamt	9.889,0	100,0%		

Ein Eintragen in ein geeignetes Koordinatensystem ergibt eine Summenverteilung, die in Abbildung 32 zu sehen ist. Diese wiederum lässt Rückschlüsse auf die Durchmesser d_{95} und d_{05} zu. Nach der Ermittlung selbiger durch Auslesen aus dem Grafen beträgt d_{95} 15,95 mm und d_{05} 0,17 mm.

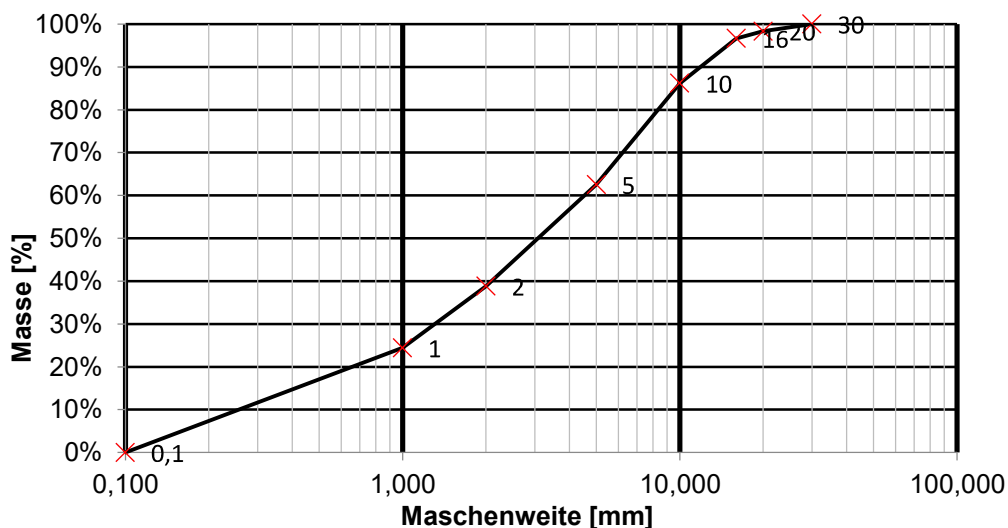


Abbildung 32: Kleinversuch 3 - Körnungssummenkurve

Auch diese Werte haben nur geringe Auswirkungen bei der Neuberechnung des Mindest-Probenumfangs. Der Wert von 500 g pro Einzelprobe des nächsten Versuchstags bleibt bestehen.

5.1.4 Siebanalyse Kleinversuch 4

Am vierten Versuchstag wurde eine große Menge an Probenmaterial hergestellt, da parallel zu dem Kleinversuch ein Großversuch stattfand. Die folgende Siebanalyse befasst sich mit den qualifizierten Stichproben des Kleinversuchs. Die Analysen des Großversuchs werden im Kapitel 5.1.8 beschrieben. Die Werte aus der Siebanalyse ergeben die in Tabelle 20 ersichtliche Verteilung.

Tabelle 20: Kleinversuch 4 - Korngrößenverteilung

Maschenweite [mm]	Masse [g _{os}]	Masse [M-% _{os}]	Akkumulierte Masse [M-% _{os}]	Siebdurchgang [M-% _{os}]
> 30	3,0	0,0%	0,0%	100,0%
> 20	58,0	0,6%	0,6%	99,4%
> 16	152,0	1,5%	2,1%	97,8%
> 10	875,0	8,9%	11,0%	88,9%
> 5	2.570,0	26,1%	37,1%	62,8%
> 2	2.663,0	27,1%	64,2%	35,8%
> 1	1.659,0	16,9%	81,1%	18,9%
< 1	1.861,0	18,9%	100,0%	0,0%
Gesamt	9.841,0	100,0%		

Nachdem die Körnungskurve (siehe Abbildung 33) erstellt ist, können die Durchmesser ausgelesen werden. Der Wert für d_{95} beträgt 14,52 mm, der für d_{05} 0,19 mm. Die Auswirkungen auf den Probenumfang bei der Neuevaluierung sind gering ausgefallen, weshalb der ursprüngliche Wert beibehalten worden ist.

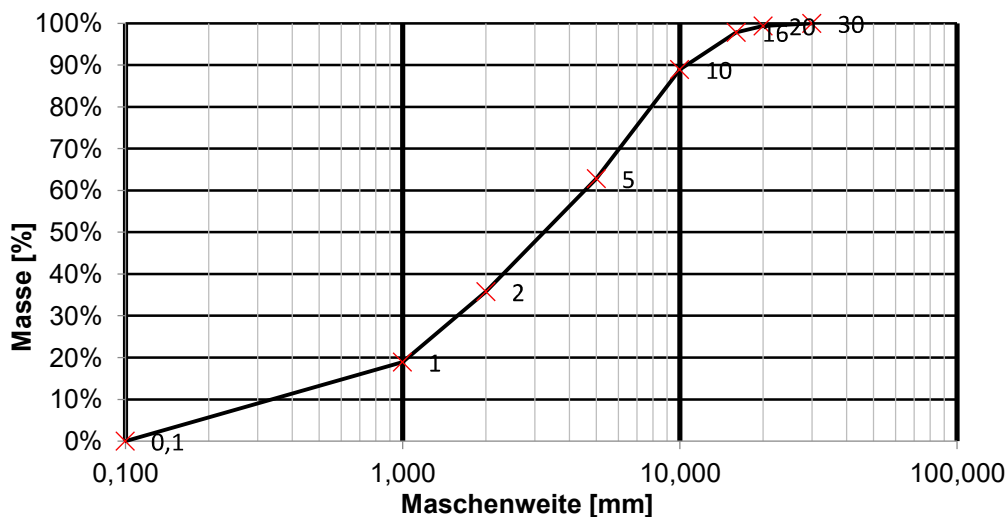


Abbildung 33: Kleinversuch 4 - Körnungssummenkurve

5.1.5 Siebanalyse Kleinversuch 5

Durch den Vergleich der Massenbilanzen von Großversuch zu Kleinversuchen sind Abweichungen aufgefallen, die nur durch die Art der Probenahme zu erklären sind. Aus diesem Grund wurden am fünften Versuchstag zwei weitere qualifizierte Stichproben entnommen und analysiert.

Die ersten zwei der vier hergestellten Stichproben wurden ohne Veränderung entnommen. Das Material wurde einer Siebanalyse unterzogen und die Ergebnisse in folgender Tabelle 21 aufgelistet.

Tabelle 21: Kleinversuch 5 - Korngrößenverteilung

Maschenweite [mm]	Masse [g _{os}]	Masse [M-% _{os}]	Akkumulierte Masse [M-% _{os}]	Siebdurchgang [M-% _{os}]
> 30	27,0	0,3%	0,3%	99,7%
> 20	243,0	2,5%	2,5%	97,2%
> 16	217,0	2,3%	4,8%	94,9%
> 10	1.127,0	11,8%	16,6%	83,1%
> 5	2.658,0	27,8%	44,5%	55,3%
> 2	2.495,0	26,1%	70,6%	29,1%
> 1	1.431,0	15,0%	85,6%	14,1%
< 1	1.350,0	14,1%	99,7%	0,0%
Gesamt	9.548,0	100,0%		

Die Summenverteilung der Siebanalyse ergibt folgende (vgl. Abbildung 34) Körnungssummenkurve. Die aus dieser Abbildung bestimmten Durchmesser ergaben für d_{95} 17,0 mm und für d_{05} 0,23 mm. Bei der Neubestimmung des Probenumfangs für den nächsten Versuchstag hat sich die Probenmenge weiter verkleinert. Da dies nicht sinnvoll wäre, ist die Probenmenge beibehalten worden.

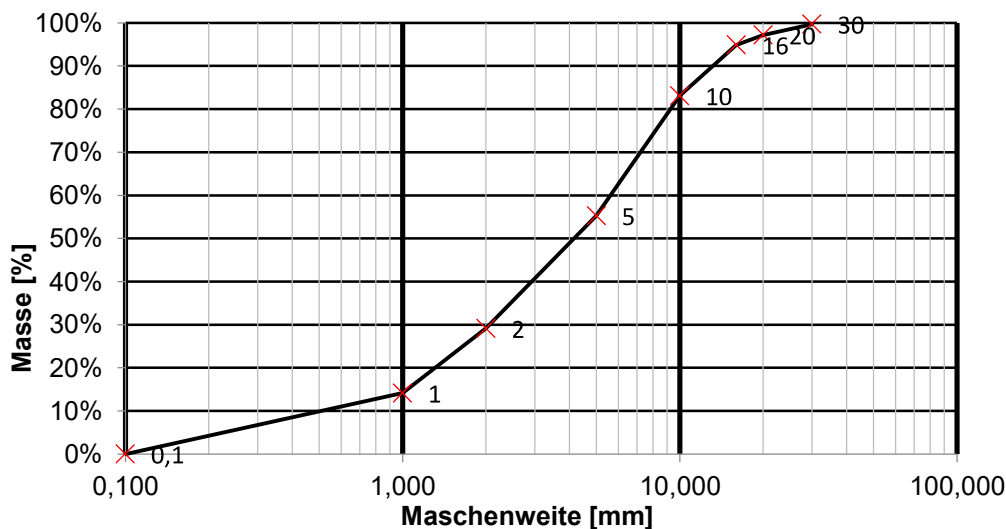


Abbildung 34: Kleinversuch 5 - Körnungssummenkurve

5.1.6 Siebanalyse Kleinversuch 5 Teil 2

Die Probenahme der qualifizierten Stichproben 3 und 4 erfolgte ähnlich der ersten beiden. Der Unterschied lag in der Öffnungszeit der Probenahmeschleuse. Die Dauer wurde von wenigen Sekunden auf 30 Sekunden ausgedehnt, bevor eine Erstellung der Probe erfolgte.

Dieses Material wurde ebenfalls einer Siebanalyse unterzogen. Die Ergebnisse der Untersuchung sind Tabelle 22 zu entnehmen.

Tabelle 22: Kleinversuch 5 - Siebanalyse - Teil 2

Maschenweite [mm]	Masse [g os]	Masse [M-% os]	Akkumulierte Masse [M-% os]	Siebdurchgang [M-% os]
> 30	176,0	1,8%	1,8%	98,2%
> 20	728,0	7,6%	7,6%	90,6%
> 16	1.109,0	11,6%	19,2%	79,0%
> 10	2.790,0	29,1%	48,3%	49,8%
> 5	2.498,0	26,1%	74,4%	23,7%
> 2	1.551,0	16,2%	90,6%	7,6%
> 1	483,0	5,0%	95,7%	2,5%
< 1	240,0	2,5%	98,2%	0,0%
Gesamt	9.575,0	100,0%		

Die aufbereiteten Daten ergeben wiederum die Summenverteilung, die in Abbildung 35 zu sehen ist.

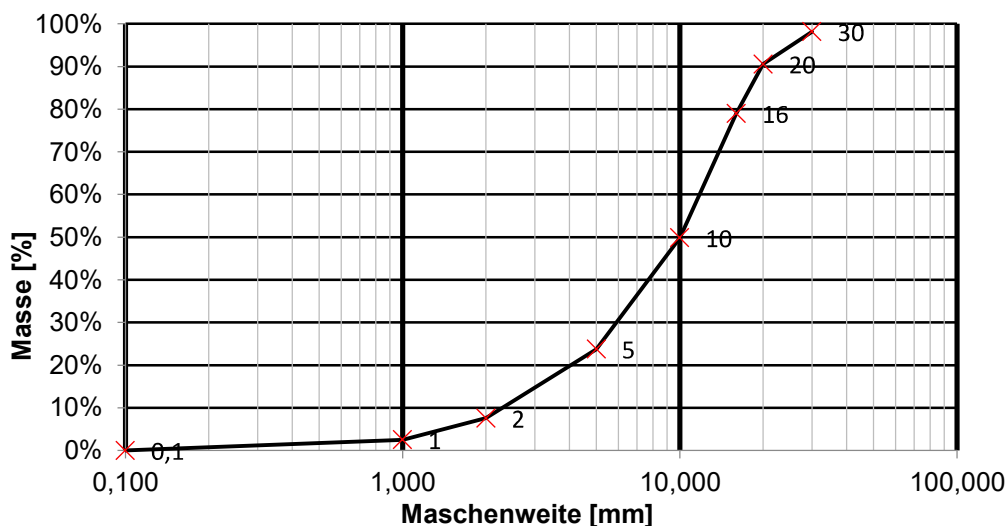


Abbildung 35: Kleinversuch 5 - Kornsummenkurve - Teil 2

Nach der grafischen Auswertung der Körnungssummenkurve haben sich für die relevanten Durchmesser folgende Werte ergeben: $d_{95} = 23,83$ mm und $d_{05} = 1,50$ mm. Die erneute Evaluierung des Probenumfangs ergab wiederum eine Reduktion der Menge für den

sechsten Versuchstag. Aus diesem Grund ist an der ursprünglichen Masse festgehalten worden.

5.1.7 Siebanalyse Kleinversuch 6

Der sechste Probenahmetag diente zur Bestätigung der tatsächlichen Massenverteilung zwischen der Fein- und Grobfraktion. Zu diesem Zweck kam es zu einer Entnahme von vier QSTP, die im Unterschied zu den vorhergehenden Kleinversuchen nicht zusammengeführt wurden. Die Siebanalyse und somit auch die Massenverteilung sind vom Probenumfang unabhängig und somit ist diese Vorgehensweise zulässig.

Nachfolgend sind die Ergebnisse der vier Siebanalysen tabellarisch und grafisch ausgewertet.

QSTP 1 Kleinversuch 6

Tabelle 23: Kleinversuch 6 - Siebanalyse QSTP 1

Maschenweite [mm]	Masse [g os]	Masse [M-% os]	Akkumulierte Masse [M-% os]	Siebdurchgang [M-% os]
> 30	69,2	1,5%	1,5%	98,5%
> 20	459,2	10,1%	10,1%	88,4%
> 16	528,9	11,6%	21,7%	76,8%
> 10	1.195,4	26,2%	47,9%	50,6%
> 5	1.460,1	32,0%	79,9%	18,6%
> 2	647,4	14,2%	94,0%	4,4%
> 1	145,0	3,2%	97,2%	1,3%
< 1	57,3	1,3%	98,5%	0,0%
Gesamt	4.562,5	100,0%		

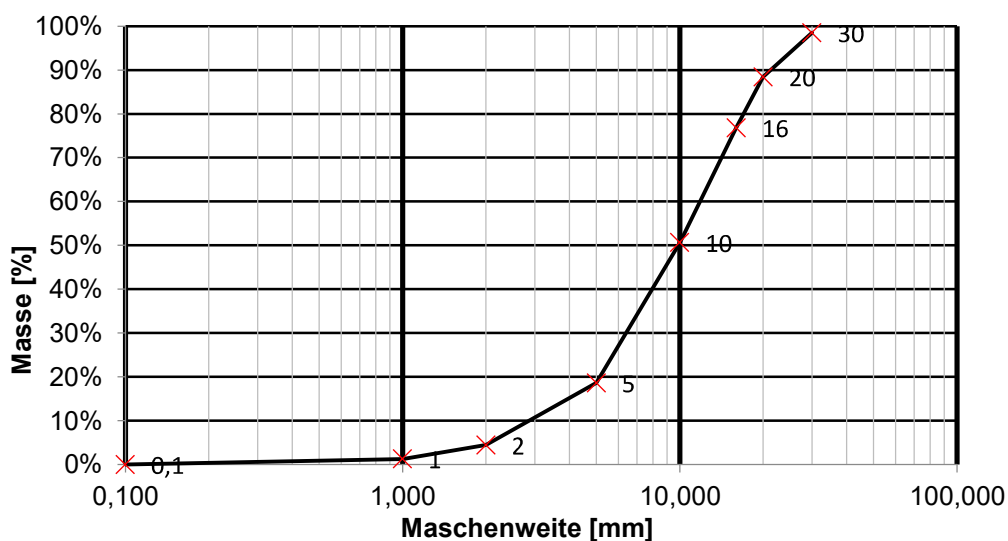


Abbildung 36: Kleinversuch 6 - Körnungssummenkurve QSTP 1

QSTP 2 Kleinversuch 6

Tabelle 24: Kleinversuch 6 - Siebanalyse QSTP 2

Maschenweite [mm]	Masse [g os]	Masse [M-% os]	Akkumulierte Masse [M-% os]	Siebdurchgang [M-% os]
> 30	74,6	1,6%	1,6%	98,4%
> 20	332,6	7,0%	7,0%	91,5%
> 16	590,6	12,4%	19,3%	79,1%
> 10	1.343,5	28,1%	47,4%	51,0%
> 5	1.524,4	31,9%	79,3%	19,2%
> 2	731,7	15,3%	94,6%	3,9%
> 1	129,3	2,7%	97,3%	1,1%
< 0,1	54,9	1,1%	98,4%	0,0%
Gesamt	4.781,6	100,0%		

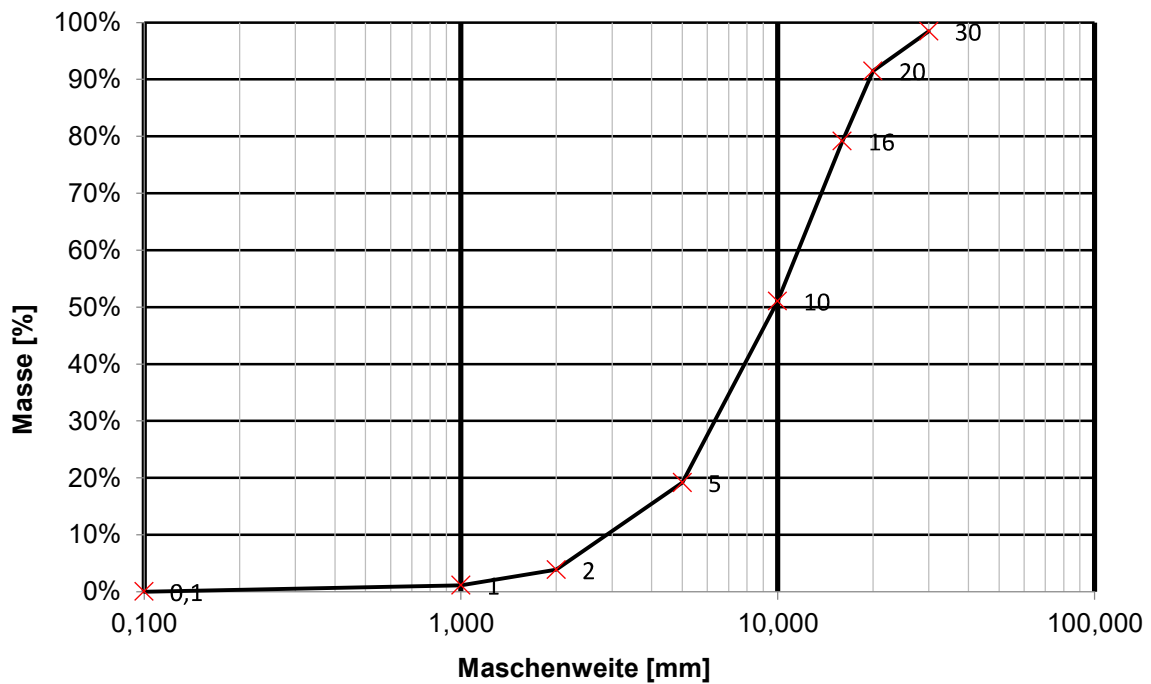


Abbildung 37: Kleinversuch 6 - Körnungssummenkurve QSTP 2

QSTP 3 Kleinversuch 6

Tabelle 25: Kleinversuch 6 - Siebanalyse QSTP 3

Maschenweite [mm]	Masse [g os]	Masse [M-% os]	Akkumulierte Masse [M-% os]	Siebdurchgang [M-% OS]
> 30	69,0	1,6%	1,6%	98,4%
> 20	467,8	10,9%	10,9%	87,5%
> 16	675,1	15,7%	26,6%	71,8%
> 10	1.189,7	27,7%	54,4%	44,0%
> 5	1.111,8	25,9%	80,3%	18,1%
> 2	543,9	12,7%	92,9%	5,5%
> 1	156,8	3,7%	96,6%	1,8%
< 0,1	77,3	1,8%	98,4%	0,0%
Gesamt	4.291,4	100,0%		

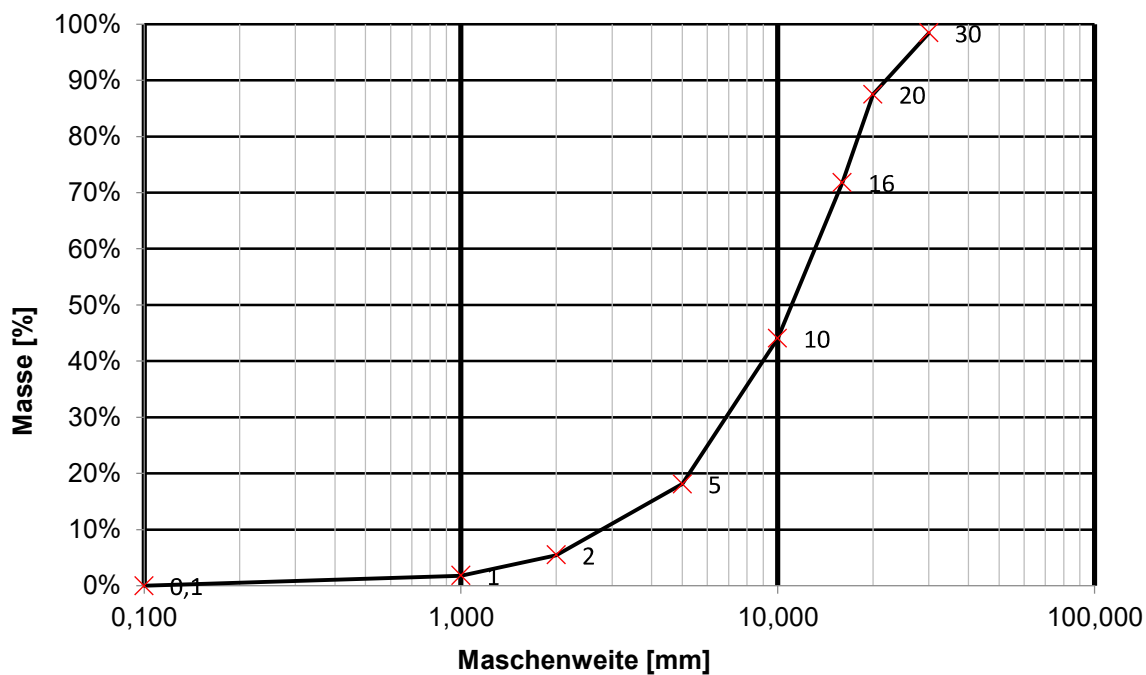


Abbildung 38: Kleinversuch 6 - Körnungssummenkurve QSTP 3

QSTP 4 Kleinversuch 6

Tabelle 26: Kleinversuch 6 - Siebanalyse QSTP 4

Maschenweite [mm]	Masse [g os]	Masse [M-% os]	Akkumulierte Masse [M-% os]	Siebdurchgang [M-% os]
> 30	78,0	1,6%	1,6%	98,4%
> 20	410,9	8,4%	8,4%	90,0%
> 16	704,5	14,4%	22,8%	75,6%
> 10	1.352,5	27,6%	50,4%	48,0%
> 5	1.316,5	26,9%	77,3%	21,1%
> 2	738,5	15,1%	92,3%	6,1%
> 1	209,1	4,3%	96,6%	1,8%
< 0,1	87,7	1,8%	98,4%	0,0%
Gesamt	4.897,7	100,0%		

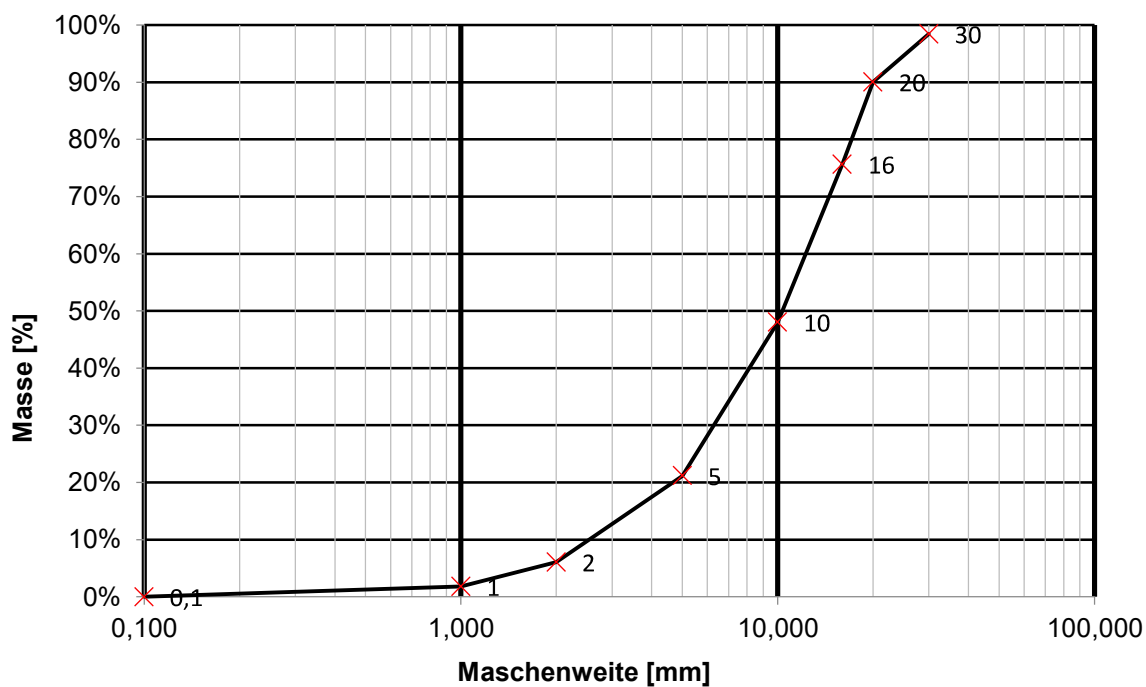


Abbildung 39: Kleinversuch 6 - Körnungssummenkurve QSTP 4

5.1.8 Siebanalyse Großversuch

Während des Großversuchs am vierten Probenahmetag sind fünf Proben zu 10 kg hergestellt worden. Diese Proben unterscheiden sich allerdings von den Proben der Kleinversuche, da vor Ort schon eine Abtrennung der Feinfraktion (≤ 5 mm) stattgefunden hat und ein weiterer Zerkleinerungsschritt durchgeführt wurde. Ein Vergleich der Ergebnisse ist somit nicht zulässig.

Probe 1

Zur ersten Siebanalyse wurde Probe 1 zu 10 kg herangezogen. Durch die Aufbereitung des Materials ergeben sich Daten, die folgende Korngrößenverteilung entstehen lassen (siehe Tabelle 27).

Tabelle 27: Großversuch - Korngrößenverteilung der Probe 1

Maschenweite [mm]	Masse [g os]	Masse [M-% os]	Akkumulierte Masse [M-% os]	Siebdurchgang [M-% os]
> 30	0,0	0,0%	0,0%	100,0%
> 20	0,0	0,0%	0,0%	100,0%
> 16	469,0	4,9%	4,9%	95,1%
> 10	3.569,0	37,0%	41,9%	58,1%
> 5	3.264,0	33,8%	75,7%	24,3%
> 2	1.666,0	17,3%	93,0%	7,0%
> 1	351,0	3,6%	96,6%	3,4%
< 1	327,0	3,4%	100,0%	0,0%
Gesamt	9.646,0	100,0%		

Durch die grafische Ausarbeitung der erhaltenen Ergebnisse lässt sich folgende Körnungssummenkurve anfertigen. (vgl. Abbildung 40). Die aus dieser Abbildung bestimmten Durchmesser ergaben für d_{95} 16,90 mm und für d_{05} 1,45 mm.

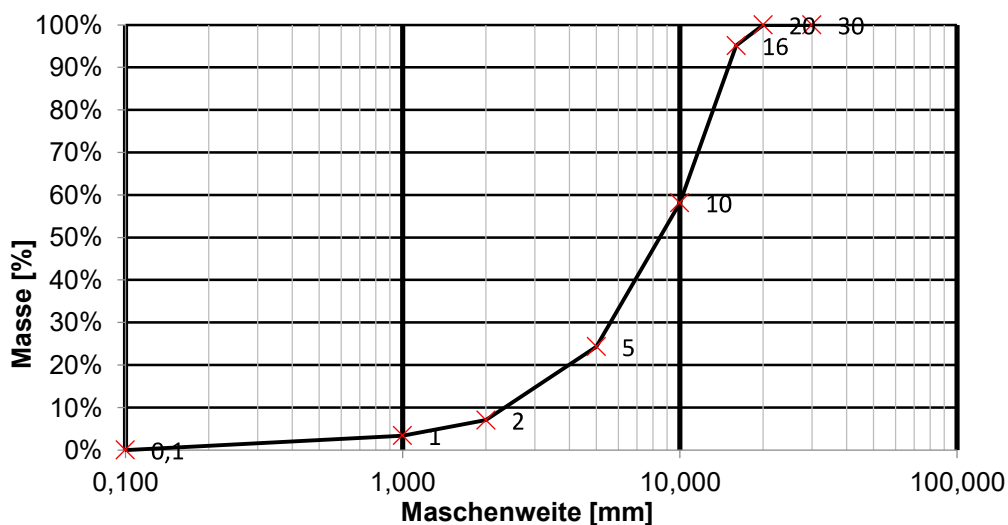


Abbildung 40: Körnungssummenkurve der Probe 1

Probe 2

Gegenstand der zweiten Siebanalyse war die zweite Probe des Großversuchs. Nach Durchführung der Untersuchung hat sich folgende Korngrößenverteilung ergeben (vgl. Tabelle 28).

Tabelle 28: Großversuch - Korngrößenverteilung der Probe 2

Maschenweite [mm]	Masse [g _{os}]	Masse [M-% _{os}]	Akkumulierte Masse [M-% _{os}]	Siebdurchgang [M-% _{os}]
> 30	0,0	0,0%	0,0%	100,0%
> 20	3,0	0,0%	0,0%	100,0%
> 16	102,0	1,0%	1,1%	98,9%
> 10	3.011,0	30,2%	31,3%	68,7%
> 5	4.641,0	46,6%	77,9%	22,1%
> 2	1.672,0	16,8%	94,7%	5,3%
> 1	289,0	2,9%	97,6%	2,4%
< 1	238,0	2,4%	100,0%	0,0%
Gesamt	9.956,0	100,0%		

Das Eintragen in ein geeignetes Koordinatensystem ergibt eine Summenverteilung, die in Abbildung 41 zu sehen ist. Diese wiederum lässt Rückschlüsse auf die Durchmesser d_{95} und d_{05} zu. Nach der Ermittlung selbiger durch das Auslesen aus dem Grafen beträgt d_{95} 15,95 mm und d_{05} 1,95 mm.

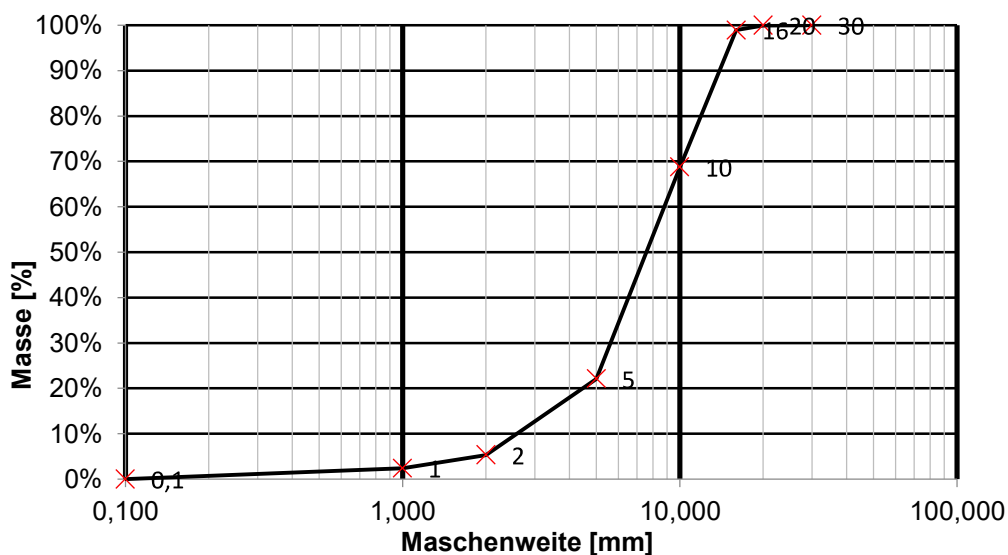


Abbildung 41: Großversuch - Körnungssummenkurve der Probe 2

Probe 3

Aus der Siebanalyse von Probe 3 wurden folgende Daten generiert (siehe Tabelle 29).

Tabelle 29: Großversuch - Korngrößenverteilung der Probe 3

Maschenweite [mm]	Masse [g _{os}]	Masse [M-% _{os}]	Akkumulierte Masse [M-% _{os}]	Siebdurchgang [M-% _{os}]
> 30	0,0	0,0%	0,0%	100,0%
> 20	0,0	0,0%	0,0%	100,0%
> 16	225,0	2,2%	2,2%	97,8%
> 10	3.588,0	35,5%	37,7%	62,3%
> 5	4.441,0	44,0%	81,7%	18,3%
> 2	1.363,0	13,5%	95,2%	4,8%
> 1	253,0	2,5%	97,7%	2,3%
< 1	231,0	2,3%	100,0%	0,0%
Gesamt	10.101,0	100,0%		

Nachdem die Körnungskurve (siehe Abbildung 42) erstellt ist, können die Durchmesser ausgelesen werden. Der Wert für d_{95} 16,43 mm beträgt der für d_{05} 2,0 mm.

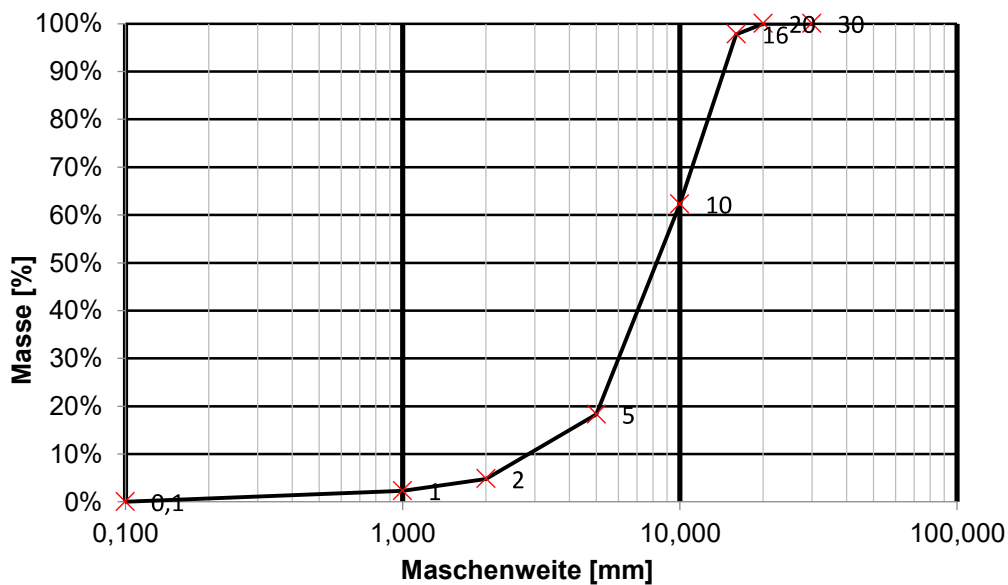


Abbildung 42: Großversuch - Körnungssummenkurve der Probe 3

Probe 4

Die vierte Untersuchung befasste sich mit der Korngrößenverteilung der Probe 4. Die Ergebnisse der Siebanalyse sind Tabelle 30 zu entnehmen.

Tabelle 30: Großversuch - Korngrößenverteilung der Probe 4

Maschenweite [mm]	Masse [g _{os}]	Masse [M-% _{os}]	Akkumulierte Masse [M-% _{os}]	Siebdurchgang [M-% _{os}]
> 30	0,0	0,0%	0,0%	100,0%
> 20	0,0	0,0%	0,0%	100,0%
> 16	18,0	0,2%	0,2%	99,8%
> 10	2.164,0	21,5%	21,7%	78,3%
> 5	5.117,0	50,8%	72,5%	27,5%
> 2	2.174,0	21,6%	94,1%	5,9%
> 1	359,0	3,6%	97,6%	2,4%
< 1	239,0	2,4%	100,0%	0,0%
Gesamt	10.071,0	100,0%		

Nachdem die Daten grafisch dargestellt (vgl. Abbildung 43) und analysiert wurden, ergeben sich für die relevanten Durchmesser d_{95} 15,24 mm und für d_{05} 1,76 mm ergeben.

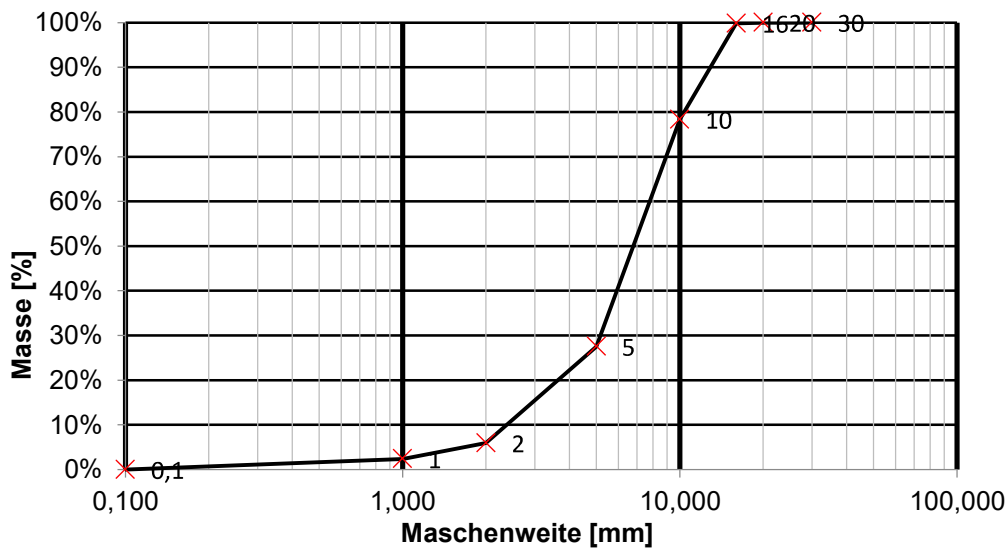


Abbildung 43: Großversuch - Körnungssummenkurve der Probe 4

Probe 5

Die Ergebnisse der Siebanalyse der fünften und letzten Probe des Großversuchs sind in Tabelle 31 aufgelistet.

Tabelle 31: Großversuch - Korngrößenverteilung der Probe 5

Maschenweite [mm]	Masse [g os]	Masse [M-% os]	Akkumulierte Masse [M-% os]	Siebdurchgang [M-% os]
> 30	0,0	0,0%	0,0%	100,0%
> 20	7,0	0,1%	0,1%	99,9%
> 16	70,0	0,7%	0,8%	99,2%
> 10	2.230,0	22,4%	23,2%	76,8%
> 5	4.799,0	48,3%	71,5%	28,5%
> 2	2.292,0	23,0%	94,5%	5,5%
> 1	344,0	3,5%	98,0%	2,0%
< 1	202,0	2,0%	100,0%	0,0%
Gesamt	9.944,0	100,0%		

Durch die grafische Ausarbeitung der erhaltenen Ergebnisse lässt sich folgende Körnungssummenkurve anfertigen. (vgl. Abbildung 40). Die aus dieser Abbildung bestimmten Durchmesser ergaben für d_{95} 15,71 mm und für d_{05} 1,86 mm.

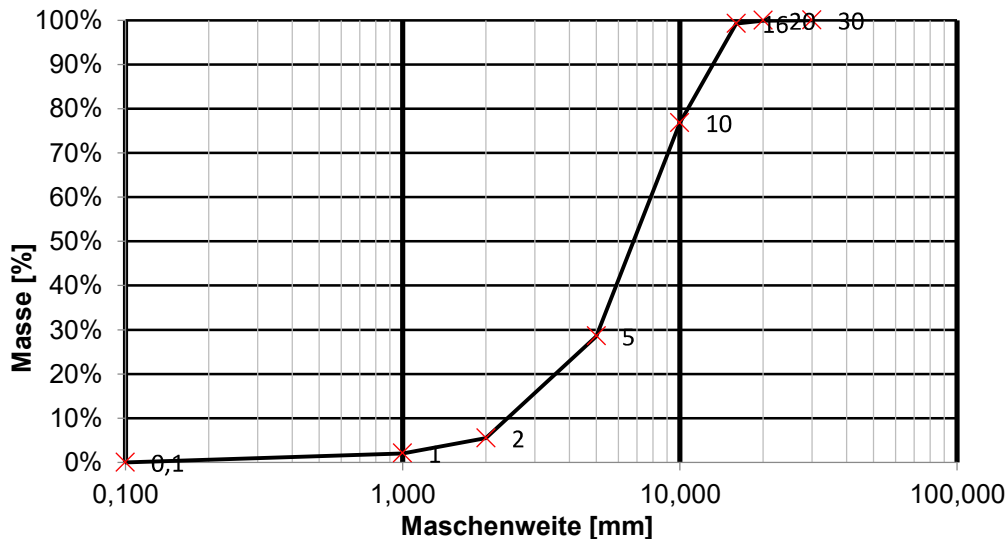


Abbildung 44: Großversuch - Körnungssummenkurve der Probe 5

5.2 Chemische Analysen

Um den erzeugten Brennstoff einsetzen zu können, ist es notwendig, qualitätsbezogene Vorgaben zu erfüllen. Da der erzeugte Ersatzbrennstoff in der Zementindustrie eingesetzt werden soll, sind die Grenzwerte der Abfallverbrennungsverordnung heranzuziehen. Außerdem sind weitere chemische Parameter von Interesse, welche die Qualität des Brennstoffs beschreiben. Zu diesen zählen unter anderem der Heizwert (Hu), der

Aschegehalt (AG) und die Trockensubstanz (TS). Die nachfolgende Tabelle zeigt die gemäß der AVV [1] vorgegebenen Grenzwerte für die Parameter, die im Zuge dieser Arbeit näher untersucht wurden.

Tabelle 32: Ausgewählte Grenzwerte für Ersatzbrennstoffe in der Zementindustrie (Auszug) [1, S. 34]

Parameter		Grenzwerte [mg/MJ _{TS}]	
		Median	80-er Perzentil
Antimon	Sb	7	10
Cadmium	Cd	0,45	0,7
Quecksilber	Hg	0,075	0,15

Ein Grenzwert für Chlor ist im Gesetzestext nicht geregelt und wird durch, wie bereits erwähnt, Kundenvorgaben festgelegt. Im Fall von ThermoTeam gibt es Absprachen, die eine Chlorkonzentration im EBS von 1‰_{OS} im Jahresmittel festsetzen. [19]

Ein Hauptaugenmerk dieser Arbeit ist es, herauszufinden, ob ein Trennschnitt bei 5 mm, das bedeutet eine Aufteilung in eine Fraktion kleiner bzw. gleich 5 mm und eine Fraktion größer 5 mm, die Qualität des Brennstoffs verändert. Zu diesem Zweck erfolgt eine Aufteilung der QSTP nach der Siebanalyse in diese Fraktionen. Diese gilt es, chemisch nach den obengenannten Kriterien zu untersuchen.

Die nachfolgenden Kapitel zeigen die Ergebnisse der Analysen.

5.2.1 Chemische Analyse Kleinversuch 1

Die zwei durch die Siebanalyse hergestellten Fraktionen haben bei der chemischen Analyse folgende Resultate gezeigt, welche in anschließender Tabelle 33 ersichtlich sind.

Tabelle 33: Kleinversuch 1 - Ergebnisse aus chemischen Analysen

Parameter		KV1 Fraktion ≤ 5mm		KV1 Fraktion > 5mm	
		Messwert	Einheit	Messwert	Einheit
Trockenrückstand	TS	90,6	%	95,3	%
Aschegehalt	AG	55,27	% _{TS}	9,38	% _{TS}
Heizwert OS	Hu OS	9.100	kJ/kg _{OS}	23.700	kJ/kg _{OS}
Heizwert TS	Hu TS	10.300	kJ/kg _{TS}	24.900	kJ/kg _{TS}
Antimon	Sb	43	mg/kg _{TS}	54	mg/kg _{TS}
Cadmium	Cd	1,4	mg/kg _{TS}	3,3	mg/kg _{TS}
Chlor	Cl	4.480	mg/kg _{TS}	17.100	mg/kg _{TS}
Quecksilber	Hg	1,5	mg/kg _{TS}	<0,25	mg/kg _{TS}

5.2.2 Chemische Analyse Kleinversuch 2

Die Untersuchungen der zwei Fraktionen zeigten folgende Ergebnisse, die in der unten angeführten Tabelle 34 zu sehen sind.

Tabelle 34: Kleinversuch 2 - Ergebnisse aus chemischen Analysen

Parameter		KV2 Fraktion ≤ 5mm		KV2 Fraktion > 5mm	
		Messwert	Einheit	Messwert	Einheit
Trockenrückstand	TS	92,9	%	97,1	%
Aschegehalt	AG	53,09	% _{TS}	9,25	% _{TS}
Heizwert OS	Hu OS	9.200	kJ/kg _{OS}	27.200	kJ/kg _{OS}
Heizwert TS	Hu TS	10.000	kJ/kg _{TS}	28.000	kJ/kg _{TS}
Antimon	Sb	33	mg/kg _{TS}	31	mg/kg _{TS}
Cadmium	Cd	1,8	mg/kg _{TS}	2,8	mg/kg _{TS}
Chlor	Cl	3.940	mg/kg _{TS}	15.500	mg/kg _{TS}
Quecksilber	Hg	0,4	mg/kg _{TS}	0,68	mg/kg _{TS}

5.2.3 Chemische Analyse Kleinversuch 3

Gegenstand der dritten chemischen Untersuchung waren die zwei Fraktionen, die sich aus den qualifizierten Stichproben des dritten Kleinversuchs ergeben haben. Die Verteilung der Inhalte der relevanten Parameter sind Tabelle 35 zu entnehmen.

Tabelle 35: Kleinversuch 3 - Ergebnisse aus chemischen Analysen

Parameter		KV3 Fraktion ≤ 5mm		KV3 Fraktion > 5mm	
		Messwert	Einheit	Messwert	Einheit
Trockenrückstand	TS	91,9	%	98,4	%
Aschegehalt	AG	50,26	% _{TS}	9,84	% _{TS}
Heizwert OS	Hu OS	12.900	kJ/kg _{OS}	24.000	kJ/kg _{OS}
Heizwert TS	Hu TS	14.300	kJ/kg _{TS}	24.400	kJ/kg _{TS}
Antimon	Sb	27	mg/kg _{TS}	45	mg/kg _{TS}
Cadmium	Cd	4,9	mg/kg _{TS}	7,7	mg/kg _{TS}
Chlor	Cl	3.040	mg/kg _{TS}	12.800	mg/kg _{TS}
Quecksilber	Hg	0,31	mg/kg _{TS}	<0,25	mg/kg _{TS}

5.2.4 Chemische Analyse Kleinversuch 4

Am vierten Versuchstag sind ein Großversuch und ein Kleinversuch durchgeführt worden. Die Resultate der chemischen Analyse der beiden Fraktionen des Kleinversuchs sind in Tabelle 36 enthalten. Die Ergebnisse des Großversuchs werden separat in Kapitel 5.2.7 besprochen.

Tabelle 36: Kleinversuch 4 - Ergebnisse aus chemischen

Parameter		KV3 Fraktion ≤ 5mm		KV3 Fraktion > 5mm	
		Messwert	Einheit	Messwert	Einheit
Trockenrückstand	TS	86,1	%	96	%
Aschegehalt	AG	53,35	% _{TS}	20,65	% _{TS}
Heizwert OS	Hu OS	7.600	kJ/kg _{OS}	24.000	kJ/kg _{OS}
Heizwert TS	Hu TS	9.200	kJ/kg _{TS}	25.100	kJ/kg _{TS}
Antimon	Sb	56	mg/kg _{TS}	70	mg/kg _{TS}
Cadmium	Cd	3,9	mg/kg _{TS}	9,9	mg/kg _{TS}
Chlor	Cl	5.310	mg/kg _{TS}	18.200	mg/kg _{TS}
Quecksilber	Hg	0,28	mg/kg _{TS}	<0,25	mg/kg _{TS}

5.2.5 Chemische Analyse Kleinversuch 5

Bei der Analyse der Massenbilanzen sind widersprüchliche Ergebnisse aufgefallen, weshalb am fünften Versuchstag zusätzlich zu den zwei QSTP zwei weitere Proben genommen und analysiert wurden.

Die Probenahme der QSTP 3 und 4 unterschieden sich in der Öffnungszeit der Probenahmeschleuse. Die Schleuse wurde mindestens 30 Sekunden lang geöffnet und erst dann die Probe aus dem Materialstrom entnommen.

Die Untersuchungsergebnisse der zwei Fraktionen mit unveränderter Vorgangsweise sind Tabelle 37 zu entnehmen.

Tabelle 37: Kleinversuch 5 - Ergebnisse aus chemischen Analysen

Parameter		KV3 Fraktion ≤ 5mm		KV3 Fraktion > 5mm	
		Messwert	Einheit	Messwert	Einheit
Trockenrückstand	TS	90,5	%	97,8	%
Aschegehalt	AG	49,01	% _{TS}	10,88	% _{TS}
Heizwert OS	Hu OS	11.000	kJ/kg _{OS}	20.000	kJ/kg _{OS}
Heizwert TS	Hu TS	12.400	kJ/kg _{TS}	20.400	kJ/kg _{TS}
Antimon	Sb	94	mg/kg _{TS}	51	mg/kg _{TS}
Cadmium	Cd	4,8	mg/kg _{TS}	5,4	mg/kg _{TS}
Chlor	Cl	4.160	mg/kg _{TS}	10.300	mg/kg _{TS}
Quecksilber	Hg	0,59	mg/kg _{TS}	0,25	mg/kg _{TS}

5.2.6 Chemische Analyse Kleinversuch 5 Teil 2

Die nachfolgende Tabelle 38 zeigt die Ergebnisse der chemischen Untersuchungen der Fraktionen, die durch die QSTP mit veränderter Öffnungsdauer der Schleuse gewonnen wurden.

Tabelle 38: Kleinversuch 5 - Ergebnisse aus chemischen Analysen - Teil 2

Parameter		KV3 Fraktion < 5mm		KV3 Fraktion > 5mm	
		Messwert	Einheit	Messwert	Einheit
Trockenrückstand	TS	87,3	%	94,2	%
Aschegehalt	AG	15,84	% _{TS}	6,03	% _{TS}
Heizwert OS	Hu OS	21.300	kJ/kg _{OS}	30.500	kJ/kg _{OS}
Heizwert TS	Hu TS	24.700	kJ/kg _{TS}	32.600	kJ/kg _{TS}
Antimon	Sb	33	mg/kg _{TS}	35	mg/kg _{TS}
Cadmium	Cd	2	mg/kg _{TS}	0,57	mg/kg _{TS}
Chlor	Cl	8.430	mg/kg _{TS}	11.700	mg/kg _{TS}
Quecksilber	Hg	<0,25	mg/kg _{TS}	<0,25	mg/kg _{TS}

5.2.7 Chemische Analyse Großversuch

Die am vierten Tag entnommenen Proben des Großversuchs sind ebenfalls chemisch untersucht worden. Da die Verteilung der relevanten Parameter schon aus den Kleinversuchen bekannt ist, haben sich die chemischen Analysen auf den Energieinhalt des Brennstoffs bezogen. Deshalb wurden nur der Heizwert und der Trockenrückstand bestimmt.

Bei den untersuchten Proben handelt es sich ausschließlich um die Fraktion größer 5 mm, die einem weiteren Aufbereitungsschritt unterzogen worden ist. Das Material ≤ 5 mm wurde verworfen, hingegen das > 5 mm erneut in die Anlage aufgegeben und einem weiteren Zerkleinerungsschritt (Shredder mit Siebeinsatz 15 mm) unterzogen. Aus diesem Material wurden fünf Proben gewonnen und chemisch analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 39 angeführt.

Tabelle 39: Großversuch – Ergebnisse aus chemischen Analysen - Proben 1-5

Parameter		Probe 1		Probe 2		Probe 3	
		Messwert	Einheit	Messwert	Einheit	Messwert	Einheit
Trockenrückstand	TS	96	%	96	%	97,2	%
Heizwert OS	Hu OS	28.800	kJ/kg _{OS}	28.300	kJ/kg _{OS}	29.300	kJ/kg _{OS}
Heizwert TS	Hu TS	31.100	kJ/kg _{TS}	29.600	kJ/kg _{TS}	30.300	kJ/kg _{TS}
Parameter		Probe 4		Probe 5			
Trockenrückstand	TS	95,9	%	95,9	%		
Heizwert OS	Hu OS	27.600	kJ/kg _{OS}	28.500	kJ/kg _{OS}		
Heizwert TS	Hu TS	28.900	kJ/kg _{TS}	29.900	kJ/kg _{TS}		

5.3 Interpretation der Analyseergebnisse

Nach der detaillierten Auflistung der erhaltenen Ergebnisse der verschiedenen Analysen erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln die Diskussion der selbigen.

5.3.1 Interpretation der Siebanalysen

Die Siebanalyse dient der Betrachtung der Korngrößen und ihrer Verteilung innerhalb der Probe. Dies gibt Aufschluss darüber, in welchem Korngrößenbereich sich das meiste Material befindet. Außerdem ist ein Hauptdiskussionspunkt dieser Arbeit, ob eine Abtrennung eines gewissen Korngrößenbereichs (aus technischer Sicht soll die Maschenweite des Siebes nicht kleiner 5 mm sein, weil ansonsten die praktische Umsetzung fraglich ist) zu einer Qualitätsverbesserung des Ersatzbrennstoffs führt.

Werden nun die fünf Siebanalysen der Kleinversuche miteinander verglichen, so ist ersichtlich, dass die Massenverteilung des Ersatzbrennstoffs zwischen den einzelnen Proben sich vergleichbar verhält. Dieser Umstand kann in der Abbildung 45 ausgelesen werden.

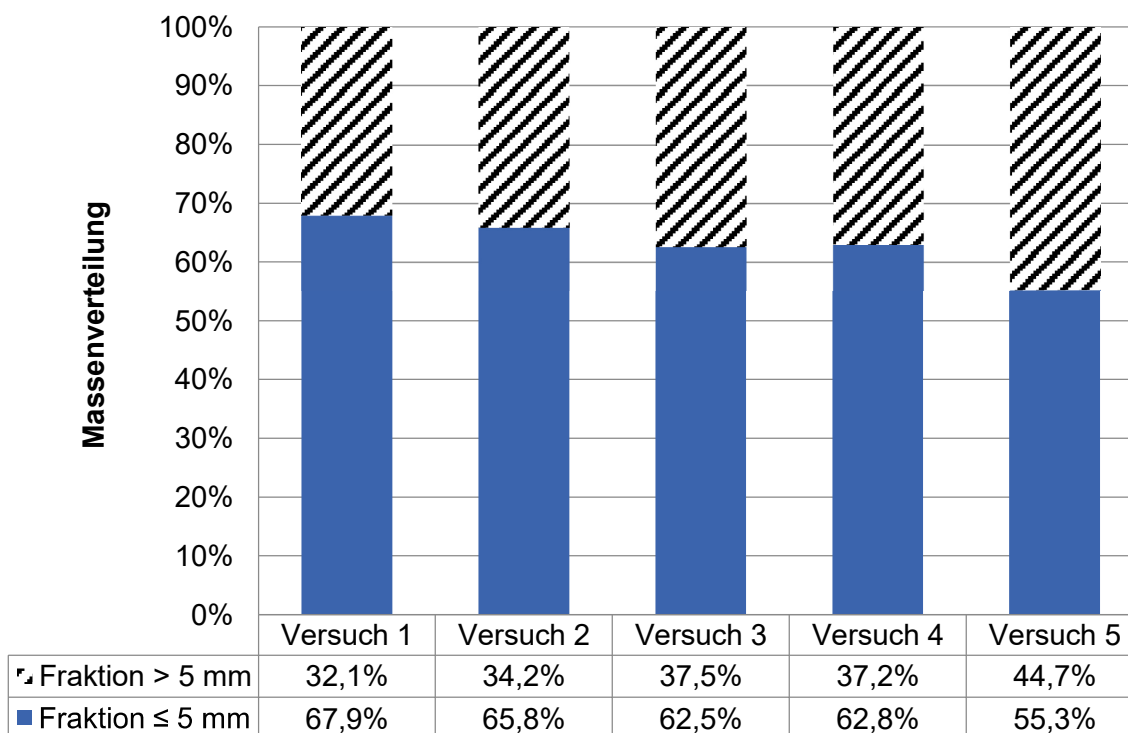


Abbildung 45: Massenverteilung in den Kleinversuchen (Proben 1-5)

Die Fraktion ≤ 5 mm hat im Mittel 62,9% der Masse der Probe, hingegen die Fraktion > 5 mm nur 37,1. Es ist zu erkennen, dass die Verteilung sich zum Ende der Probenreihe verschiebt, aber sich an der generellen Aufteilung zwischen Fein- und Grobfraktion nichts verändert.

Das Material, das beim Großversuch entnommen wurde, wurde ebenfalls einer Siebanalyse unterzogen. Die fünf untersuchten Proben wurden im Vergleich zu den Kleinversuchen weiteren Aufbereitungsschritten unterzogen. Durch Siebung wurde ein Trennschnitt bei 5 mm erreicht. Die Fraktion ≤ 5 mm wurde verworfen und das restliche Material erneut in die Anlage aufgegeben und zerkleinert. Außer dem Zerkleinerungsaggregat war keine Aufbereitungsmaschine im zweiten Durchlauf zugeschaltet. Die Massenverteilungen der fünf Proben teilen sich wie folgt auf (vgl. Abbildung 46).

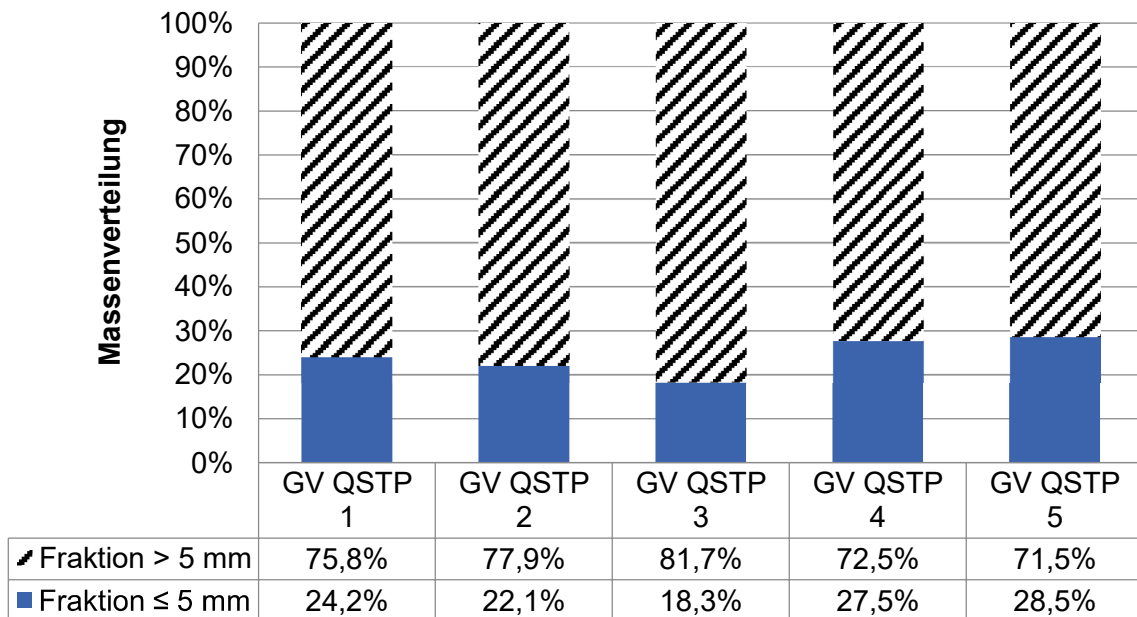


Abbildung 46: Massenverteilung im Großversuch (Proben 1 - 5)

Durchschnittlich umfasst die Fraktion ≤ 5 mm 24,1% und die Grobfraktion 75,9%. Die Verteilung innerhalb der Versuchsreihe hat keine außergewöhnlichen Spitzen.

Auch wenn ein direkter Vergleich mit den Kleinversuchen durch die zusätzlichen Aufbereitungsmaßnahmen nicht möglich ist, ist der markante Unterschied in der Massenverteilung doch eindeutig. Die Verteilung ist beinahe gegengleich und gibt Grund zu weiteren Nachforschungen.

Die in Abbildung 47 ersichtliche Verteilung der Großprobe wird nun ebenfalls eingehender betrachtet.

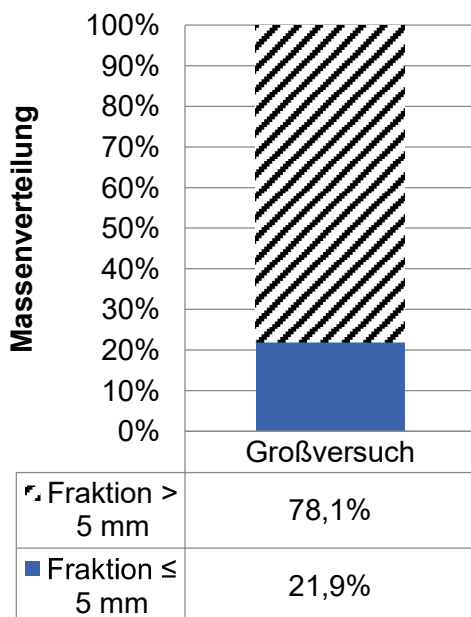


Abbildung 47: Verteilung Großversuch

Die Großprobe umfasste 437,1 kg, wobei 341,5 kg der Fraktion > 5 mm und 95,6 kg der Feinfraktion ≤ 5 mm zugerechnet werden kann, welche jedoch verworfen wurde. Die so erhaltene Verteilung von 78,1% (Grobfraktion) und 21,9% (Feinfraktion)

Wie aus der ersichtlich ist, entspricht die prozentuale Verteilung der Fraktionen des Großversuchs nicht der Verteilung der Kleinversuche. Dies war ohnehin nicht zu erwarten, da bei den Kleinversuchen kein zusätzlicher Verfahrensschritt durchgeführt wurde.

Die Ursache für diese Abweichung ist mit hoher Wahrscheinlichkeit der Probenahme zuzuordnen. Nach dem Vergleich der Protokolle und der Verfahrensabläufe ist der einzige Unterschied in der Öffnungszeit der Probenahmeschleuse zu finden.

Die Großprobe bestand aus acht Einzelproben zwischen 50 und 65 kg. Um diese Menge aus dem Produktstrom zu entnehmen, ist eine längere Öffnungszeit der Schleuse notwendig als bei der Herstellung einer Einzelprobe mit 500 g. Da die Schleuse so konstruiert wurde, dass die Probe aus dem laufenden Materialstrom entnommen werden kann, sollten Anhaftungen oder ähnliche Verfälschungen nicht möglich sein.

Jedoch deuten die Ergebnisse der Siebanalysen auf diesen Umstand hin, wodurch weitere Untersuchungen erforderlich wurden. Da dieser Umstand direkt nach dem vierten Versuch auffällig wurde, erfolgte am fünften Versuchstag die Entnahme von zwei weiteren QSTP (für die Siebanalyse zu einer Probe vereint) zusätzlich zu den üblich genommenen zwei QSTP. Der einzige Unterschied zu der üblichen Herangehensweise war, dass die Schleusenöffnung eine halbe Minute geöffnet blieb, bevor die Entnahme der Probe stattfand. Auch diese zusätzlichen QSTP wurden einer Siebanalyse unterzogen und chemisch untersucht. Die nachfolgende Abbildung 48 zeigt die Massenverteilung der Proben mit der variierten Öffnungszeit der Schleuse und der Kleinversuchsreihe.

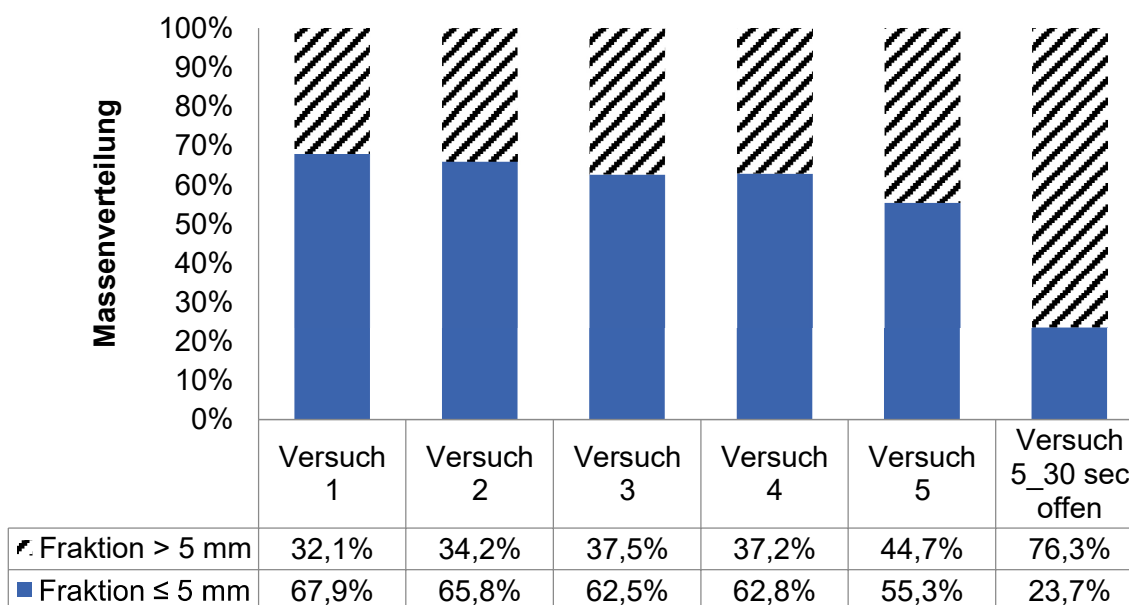


Abbildung 48: Vergleich der Massenverteilungen der Kleinversuche (1 – 5) und zusätzlicher Versuch 30 sec.

Es ist zu erkennen, dass die Öffnungszeit einen großen Einfluss auf das Ergebnis der Proben hat. Die Verteilung der Masse gleicht der des Großversuchs beinahe genau und entspricht den Erwartungen.

Durch einen zusätzlichen Versuchstag und genaue Dokumentation der Schleusenanlage soll dieses Phänomen weiter untersucht werden.

5.3.2 Interpretation der chemischen Analysen

Damit der EBS in einer Mitverbrennungsanlage energetisch verwertet werden kann, muss dieser gewissen vorgegebenen Qualitätskriterien entsprechen. Neben dem Energie- und Wasserinhalt sind auch die Schwermetallkonzentrationen für das Produkt von Bedeutung. Deshalb wurden neben den Siebanalysen, die die physikalische Beschaffenheit des EBS beschreiben, auch umfangreiche chemische Untersuchungen durchgeführt.

Die in Kapitel 5.2 dargestellten Daten wurden zusammengeführt und interpretiert. Dies geschieht auf den nachfolgenden Seiten.

Im vorigen Kapitel wurde auf die Diskrepanz bei den Probenahmen hingewiesen. Dies hat Auswirkungen auf die Betrachtung der chemischen Untersuchungen. Es sind zwei Vorgangsweisen möglich:

- Aufrechnung der Konzentrationen und Inhalte auf die mittlere Massenverteilung der Kleinversuche (V1, V2, V3, V4, V5) und
- Aufrechnung der Konzentrationen und Inhalte auf die mittlere Massenverteilung des Großversuchs und Kleinversuch V5 30 Sekunden, sowie QSTP 1-4 des sechsten Versuchstags

Die Auswertung basiert auf der Massenverteilung der Trockensubstanz (TS) bezogen auf 100%, da nur so eine schlüssige Aufteilung der unterschiedlichen Parameter möglich ist.

In der nachfolgenden Tabelle 40 sind die Mittelwerte einander gegenübergestellt.

Tabelle 40: Mittlere Massenverteilungen

Mittlere Massenverteilung der Kleinversuche			Mittlere Massenverteilung des Großversuchs und Kleinversuch 5 30 Sekunden, sowie QSTP 1 - 4 des sechsten Versuchstags		
Fraktion ≤ 5 mm	Einheit	Fraktion > 5 mm	Fraktion ≤ 5 mm	Einheit	Fraktion < 5 mm
56,3	Gew.% _{OS}	43,7	20,6	Gew.% _{OS}	79,4
50,8	Gew.% _{TS}	42,0	18,5	Gew.% _{TS}	76,6
54,7	Gew.% _{TS} bezogen auf 100 %	45,3	19,5	Gew.% _{TS} bezogen auf 100 %	80,5

Es ist zu erkennen, dass die Werte deutlich voneinander abweichen. Daher ist es nicht verwunderlich, dass sowohl die analytischen (vgl. Tabelle 41 und Tabelle 42) als auch die grafischen Auswertungen (siehe Abbildung 49 und Abbildung 50) nicht korrelieren, was die Frage aufwirft, welche der Ergebnisse als Diskussionsgrundlage dienen müssen.

Weiter ist es zulässig, die erhaltenen Werte der chemischen Untersuchungen beliebig auf die unterschiedlichen Verteilungen, in Form von Transferkoeffizienten (d. h. durch prozentuale Aufteilung) aufzuteilen, da die Analysen nicht mit den Fraktionen der Maschenweite der Siebanalyse durchgeführt wurden und somit daran gebunden sind, sondern schon zusammengefasst als Feinfraktion (≤ 5 mm) und Grobfraktion (> 5 mm) im Labor Eingang gefunden haben.

In Kapitel 5.3.1 wurde schon eingehend darauf hingewiesen, dass den Verteilungen des Großversuchs und des Kleinversuchs mit einer Öffnungszeit der Schleusenklappe von 30 Sekunden der Vorzug zu geben ist.

Grund für die Aufteilung der Konzentrationen der Parameter auf Fein- und Grobfraktion ist eine Beurteilung über eine mögliche Verbesserung der Qualität des EBS. Der neue EBS wäre eigentlich die o.a. Grobfraktion, d.h. „EBS PREMIUM Quality neu“. Es wird angedacht, den Prozess um eine weitere Absiebung zu erweitern und die folgenden Interpretationen sollen Aufschluss über die Sinnhaftigkeit geben.

Tabelle 41: Zusammenfassung der chemischen Auswertungen (Mittelwert Kleinversuche)

Parameter	Bez.	Einheit	Fraktion ≤ 5 mm	Fraktion > 5 mm	Anteil Fraktion ≤ 5mm [%]	Anteil Fraktion > 5 mm [%]
Trockensubstanz	TS	[%]	89,9	96,5	59,5	40,5
Wassergehalt	WG	[%]	10,1	3,5	83,6	16,4
Aschegehalt	AG	[% _{TS}]	46,1	11,0	87,2	12,8
Heizwert OS	Hu OS	[kJ/kg _{OS}]	11.850,0	24.900,0	39,7	60,3
Heizwert TS	Hu TS	[kJ/kg _{TS}]	13.483,3	25.900,0	41,9	58,1
Antimon	Sb	[mg/kg _{TS}]	47,7	47,7	59,7	40,3
Cadmium	Cd	[mg/kg _{TS}]	3,1	4,9	47,6	52,4
Chlor	Cl	[mg/kg _{TS}]	4.893,3	14.266,7	31,1	68,9
Queck-silber	Hg	[mg/kg _{TS}]	0,6	0,3	69,2	30,8

Tabelle 42: Zusammenfassung der chemischen Auswertungen (Mittelwert GV, V5 30 Sekunden sowie QSTP 1-4 des sechsten Versuchstags)

Parameter	Bez.	Einheit	Fraktion ≤ 5 mm	Fraktion > 5 mm	Anteil Fraktion ≤ 5mm [%]	Anteil Fraktion > 5 mm [%]
Trockensubstanz	TS	[%]	89,9	96,5	18,4	81,6
Wassergehalt	WG	[%]	10,1	3,5	42,7	57,3
Aschegehalt	AG	[% _{TS}]	46,1	11,0	50,3	49,7
Heizwert OS	Hu OS	[kJ/kg _{OS}]	11.850,0	24.900,0	10,1	89,9
Heizwert TS	Hu TS	[kJ/kg _{TS}]	13.483,3	25.900,0	11,0	89,0
Antimon	Sb	[mg/kg _{TS}]	47,7	47,7	19,1	80,9
Cadmium	Cd	[mg/kg _{TS}]	3,1	4,9	18,1	81,9
Chlor	Cl	[mg/kg _{TS}]	4.893,3	14.266,7	7,9	92,1
Queck-silber	Hg	[mg/kg _{TS}]	0,6	0,3	28,6	71,4

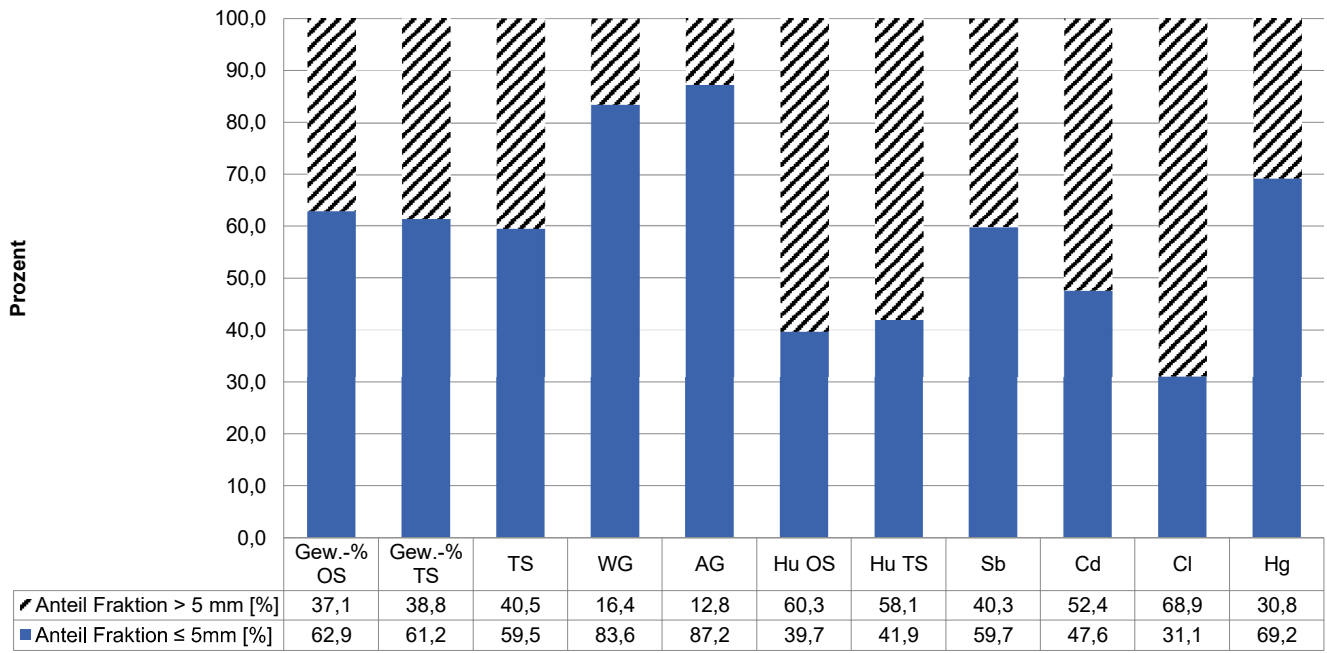


Abbildung 49: Kleinversuche – Zusammenfassung der Transferkoeffizienten (bezogen auf den Mittelwert der Verteilungen aus V1, V2, V3, V4, V5)

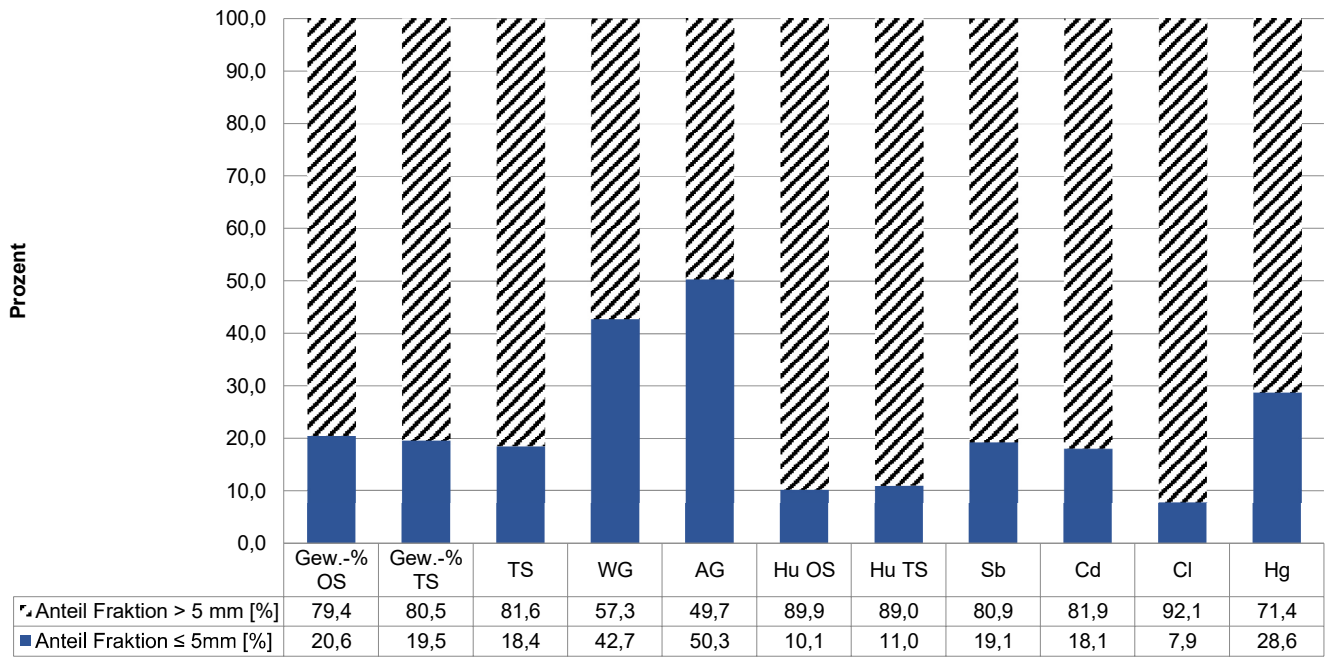


Abbildung 50: Großversuch inkl. ergänzende Untersuchungen- Zusammenfassung der Transferkoeffizienten (bezogen auf den Mittelwert der Verteilungen aus Großversuch, V5 30 Sekunden sowie QSTP 1-4 des sechsten Versuchstags)

Betrachtung der Verteilungen der verschiedenen Parameter

Wie eingangs schon erwähnt, zeigt sich eine Massenverteilung zwischen den zwei betrachteten Fraktionen von 20,6% zu 79,4%. Das bedeutet, dass ca. ein Fünftel der Originalsubstanz und der Trockensubstanz als Feinfraktion und vier Fünftel als „EBS PREMIUM Quality neu“ vorliegen.

Der Aschegehalt wiederum teilt sich beinahe zu 50% auf „EBS PREMIUM Quality neu“ und die Feinfraktion ≤ 5 mm auf. Der Parameter Wassergehalt zeigt, dass der EBS neu 57,3% des gesamten Wassers mit führt.

Es ist nicht weiter verwunderlich, dass der Heizwert überwiegend im „EBS PREMIUM Quality“ neu beinhaltet ist, da in diesem Material deutlich mehr brennbare Stoffe wie z.B. Kunststoffe, Papier usw. zu finden sind.

Die Verteilung der Schwermetalle zwischen den beiden Fraktionen zeigt ein recht einheitliches Bild. Der Anteil von Antimon und Cadmium in der Feinfraktion, mit jeweils 19,1 und 18,1%, machen rund ein Fünftel der Gesamtbelastung des Ersatzbrennstoffs EBS PREMIUM Quality aus. Quecksilber ist mit 28,6% in der Feinfraktion und 71,4% im EBS PREMIUM Quality neu vertreten.

Die Chlorbelastung zeigt eine stark einseitige Verteilung. Diese ist hauptsächlich (92,1%) im EBS PREMIUM Quality neu enthalten.

Die Auswirkungen einer Abtrennung der Feinfraktion und die Auswirkungen auf den Brennstoff werden im nächsten Kapitel eingehend besprochen.

Betrachtung der Grenzwerte der beiden Fraktionen aus den Kleinversuchen

Die Grenzwerte für Schwermetalle gem. AVV [1] sind gesetzlich nicht an Gewichtsprozente gebunden, sondern werden über den Heizwert umgerechnet. Durch die Aufteilung der Frachtstoffe und die Umrechnung der Inhaltstoffe auf den Heizwert der betreffenden Fraktion lässt sich eine Grenzwertbetrachtung durchführen.

In der nachfolgenden Tabelle 43 erfolgt eine Gegenüberstellung der gesetzlich (gem. AVV) vorgeschriebenen und der aus eigenen Untersuchungen ermittelten Messwerte der Gruppen Feinfraktion und EBS PREMIUM Quality neu.

Tabelle 43: Gegenüberstellung von vorgeschriebenen Grenzwerten zu den ermittelte Messwerten

Parameter	Grenzwerte [mg/MJ]		Fraktion ≤ 5 mm		Fraktion > 5 mm	
	Median	80-er Perzentil	Median	80-er Perzentil	Median	80-er Perzentil
Antimon	7	10	3,7	6,1	2,0	2,5
Cadmium	0,45	0,70	0,26	0,39	0,2	0,31
Quecksilber	0,075	0,15	0,035	0,05	0,010	0,01

Aus den Daten geht hervor, dass keine der beiden betrachteten Fraktionen eine Grenzwertüberschreitung aufweist und diese somit rechtskonform in Anlagen zur

Zementerzeugung eingesetzt werden können. Dieser Umstand ist essenziell und wird im anschließenden Kapitel weiter ausgeführt.

Betrachtung und Vergleich des Trockenrückstands zwischen unbehandelter Fraktion > 5 mm aus Kleinversuchen und behandelter Fraktion > 5 mm aus dem Großversuch

War die Feinfraktion abgeschieden, erfolgte eine weitere Zerkleinerung des groben Materials, um die brennstofftechnischen Eigenschaften (insbesondere die Korngrößenverteilung und die Dauer der Materialverbrennung im Drehrohrofen) zu verbessern.

Tabelle 44: Vergleich des Trockenrückstands

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Fraktion > 5 mm (Kleinversuche, unbehandelt)	Fraktion > 5 mm (Großversuch, behandelt)
Trockensubstanz	TS	[%]	96,5	96,2

Der zusätzliche Zerkleinerungsschritt hat zwar keine nennenswerten Auswirkungen auf den Anteil der Trockensubstanz des Materials, da der EBS PREMIUM Quality neu bereits einen sehr hohen TS (d.h. 96,5%) hat, jedoch eine positive Auswirkung auf die Korngrößenverteilung. Auf diesen Sachverhalt wird in Kapitel 6 näher eingegangen.

6 Diskussion

Dieses Kapitel widmet sich den Fragen und Ergebnissen, die diese Arbeit hervorgebracht hat und diskutiert die Auswirkungen.

Es werden folgende Punkte näher erörtert:

- Probenahmefehler,
- Massenverteilung Grobfraction zu Feinfraktion,
- Verteilung der Parameter zwischen den zwei Fraktionen,
- Verbrennungseigenschaften und
- Einsatz der beiden Fraktionen im Zementwerk.

6.1 Probenahmefehler

Wie beschrieben, ist es zu Widersprüchen bei den Probenahmen gekommen. Die Massenbilanzen der Kleinversuche korrelierten nicht mit der des Großversuchs. Dieser Umstand warf Fragen auf, die durch weitere Untersuchungen abgeklärt wurden.

Da die Probennahme des Großversuchs genauso erfolgte wie die der Kleinversuche und der einzige Unterschied darin bestand, dass die Öffnungszeit der Schleuse variierte, lag der Schluss nahe, dass hier der Grund für die Abweichungen zu suchen war. Zur Bestätigung des Verdachts erfolgte am fünften Versuchstag die zusätzliche Probenahme zwei weiterer QSTP mit veränderter Öffnungszeit der Probenahmeschleuse. Die Siebanalysen zeigten eine Massenverteilung, die der des Großversuchs entsprach. Diese Ergebnisse waren der Auslöser für einen weiteren Versuchstag, an dem weitere vier QSTP mit einer längeren Öffnungszeit der Klappe erstellt wurden.

Im Zuge dieses Versuchstags erfolgte eine eingehende Untersuchung der Entnahmevorrichtung, um den Grund des Fehlers ausfindig zu machen.

Beschreibung der Probenahmeschleuse

Der Transport des Produkts in Richtung Lager und Verladung geschieht in der Anlage mittels Tragkettenförderer. In diesen Förderer wurde nachträglich die Probenahmeschleuse eingebaut. Dazu wurde an der Unterseite eine Öffnung geschnitten, die durch die Schleusenklappe abgedeckt ist. Durch eine pneumatische Vorrichtung kann diese Klappe geöffnet und geschlossen werden. Indem die Förderung des Materials während die Klappe bewegt wird durch die Kette kontinuierlich erfolgt, wird Material durch die Öffnung in den Probenahmebehälter geworfen. Zwecks besseren Verständnisses zeigt Abbildung 51 eine Skizze der Probenahmeschleuse.

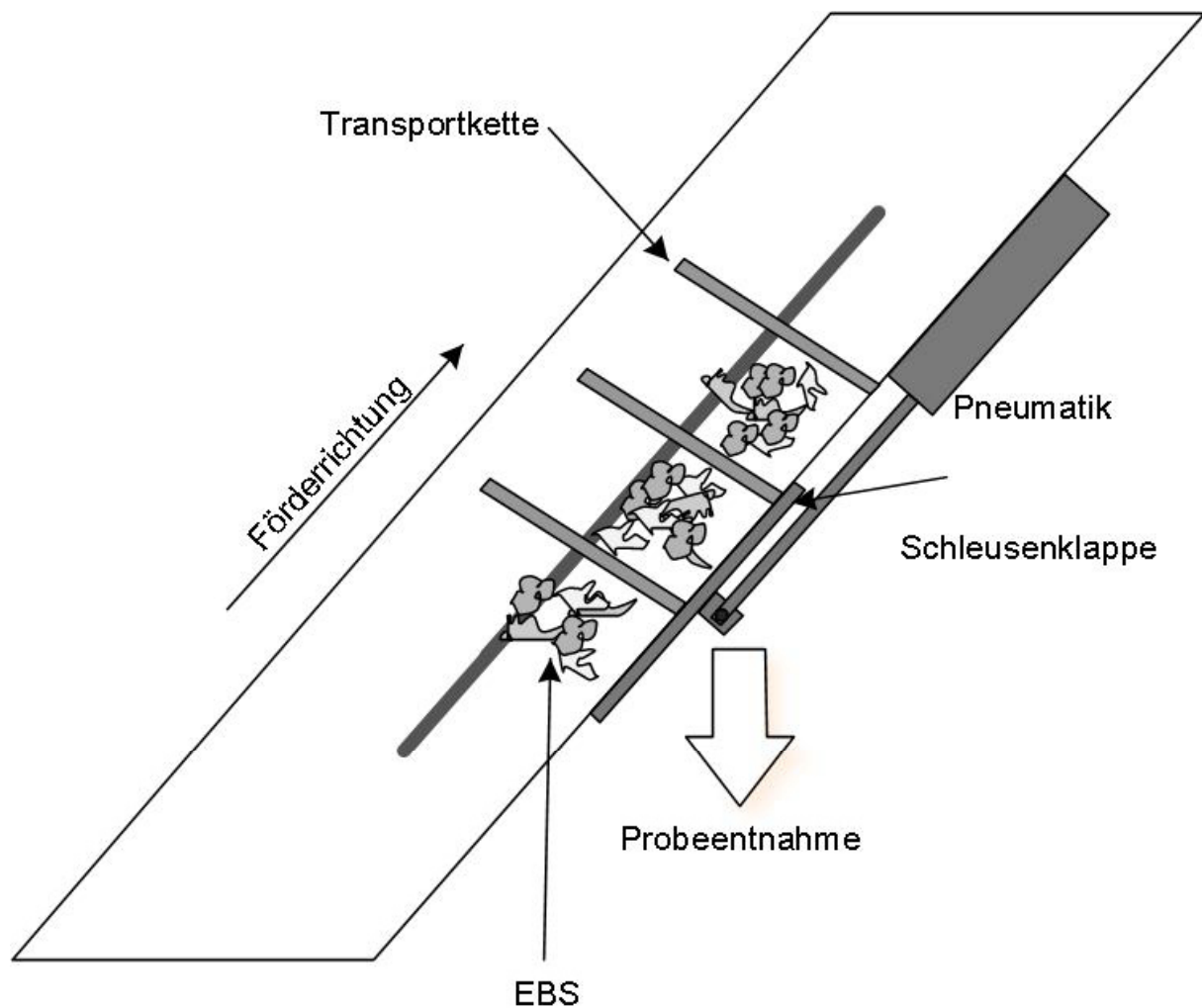


Abbildung 51: Skizze Probenahmeschleuse (Seitenansicht)

Durch die Konstruktion sollte es möglich gemacht werden, Proben aus dem Produktstrom zu ziehen und so die Repräsentativität zu gewährleisten. Wie die Versuche zeigten, ist dies nicht der Fall.

Ausführung des Konstruktionsfehlers

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Schleusenklappe im geschlossenen und geöffneten Zustand. In Abbildung 52 sind die Führungsschienen der Klappe sowie die Klappe selbst zu sehen. Es sind Ablagerungen um die Öffnung zu erkennen, die bei Betätigung der Klappe in den Behälter fallen und so die Probe beeinflussen können.

Es ist allerdings nicht möglich, die Vorrichtung komplett abzudichten und so ergibt sich die Empfehlung, die Schleuse vor den Probennahmen mit Druckluft zu spülen, um so das Abrieseln in die Probe zu verhindern. Die Menge dieser möglichen Verunreinigung ist aber sehr gering und kann nicht verantwortlich sein für die angesprochenen Ergebnisse.



Abbildung 52: Probenahmeschleuse im geschlossenen Zustand

Bei geöffneter Klappe zeigt sich jedoch ein anderes Bild. Es sind verdichtete Feinmaterialien zu entdecken, die mehr Feinfraktion (vgl. Abbildung 53) beinhalten und somit Aufschluss geben, dass hier die Ursache zu suchen ist.



Abbildung 53: Probenahmeschleuse im offenen Zustand

In der Detailansicht (siehe Abbildung 54) kann ein deutlicher Abstand (rote Markierung) zwischen Tragkettenförderblatt und der Führungsschiene der Schleusenklappe erkannt werden. Dieser Abstand schafft Raum zwischen der geschlossenen Platte und dem Förderblatt, der durch das feine Material des Ersatzbrennstoffs aufgefüllt wird. Es erfolgt ein

Mitreissen der Grobfraktion durch die Bewegung des Fördermechanismus. Das Auffüllen mit ausgewähltem Feinmaterial geschieht so schnell, dass sich schon nach ca. 45 Sekunden wieder genug Feinfraktion angesammelt hat, um die Probennahme zu verfälschen. Ein genaues Abwiegen der Menge, die beim Öffnen abgeworfen wird, war vor Ort nicht möglich, aber durch geeignetes Abschätzen ergab sich eine Menge von ungefähr 250 - 400 g.



Abbildung 54: Probenahmeschleuse Detailansicht

6.2 Qualitätseigenschaften von Ersatzbrennstoffen

Ersatzbrennstoffe müssen sowohl gesetzlichen als auch kundenorientierten Vorgaben genügen. Diese qualitativen Eigenschaften können in vier Kategorien eingeteilt werden, die nachfolgend aufgeführt sind.

Qualitätseigenschaften von Ersatzbrennstoffen: [20, S. 28ff.]

- Chemische,
- Mechanische,
- Kalorische,
- Reaktionstechnische.

Zu den chemischen Eigenschaften zählen:

- Anteil an nichtbrennbaren und brennbaren Inhaltstoffen,
- Anteil an organischen Bestandteilen, insbesondere Kunststoffen,
- Spuren- und Elementarzusammensetzungen,
- Anteil von fixiertem Kohlestoff,
- Anteil an flüchtigen Bestandteilen,
- Ascheerweichungspunkte.

Als mechanische Eigenschaften sind folgende Eigenschaften relevant:

- Dichte,
- Schütteeigenschaften,
- Mahlbarkeit,
- Korngrößenverteilung,
- Lagerfähigkeit und Transportfähigkeit.

Die kalorischen Eigenschaften umfassen:

- Heiz- und Brennwert,
- spezifischen Mindestluftbedarf,
- spezifische Mindestabgasmenge,
- adiabate Verbrennungstemperatur,
- Wärmekapazität,
- Wärmeleitfähigkeit
- Temperaturleitfähigkeit.

Die reaktionstechnischen Eigenschaften lassen sich nicht einfach festmachen. Sie hängen eng mit dem Zünd- und Ausbrandverhalten zusammen und diese sind wiederum mit einer Vielzahl an Faktoren verbunden.

6.3 Auswirkungen einer Abtrennung der Feinfraktion

Die Fraktionen teilen sich im Mittel in 20,6% Fein- und 79,4% Grobfraktion bzw. EBS PREMIUM Quality neu auf. Werden diese Werte nun auf die Jahresmenge von qualitätsgesichertem Ersatzbrennstoff bezogen, so erhält man folgende Aufteilung. [21]

EBS	Aufteilung [%]	Menge [t/a]
EBS gesamt	100	79.898,2
Fraktion ≤ 5 mm (mittelkalorisch)	20,6	16.459,0
Fraktion > 5 mm (hochkalorisch)	79,4	63.439,2

Es stellt sich nun die Frage, welche Auswirkungen eine Abtrennung der Feinfraktion für die Qualität des EBS PREMIUM hat. Die unten angeführte Tabelle 45 und Abbildung 55 soll die Diskussion unterstützen.

Tabelle 45: Verteilung der Parameter, chemisch-physikalischer Ergebnisse aus Kleinversuchen

Parameter	Einheit	Fraktion ≤ 5 mm	Fraktion > 5 mm	Probe total
Trockensubstanz	[%]	89,9	96,5	95,2
Wassergehalt	[%]	10,1	3,5	4,8
Aschegehalt	[% TS]	46,1	11,0	17,9
Heizwert OS	[MJ/kg OS]	11,9	24,9	22,3
Heizwert TS	[MJ/kg TS]	13,5	25,9	23,4
Antimon	[mg/kg TS]	47,7	47,7	47,7
Cadmium	[mg/kg TS]	3,1	4,9	4,6
Chlor	[mg/kg TS]	4,9	14,3	12,4
Quecksilber	[mg/kg TS]	0,6	0,3	0,4

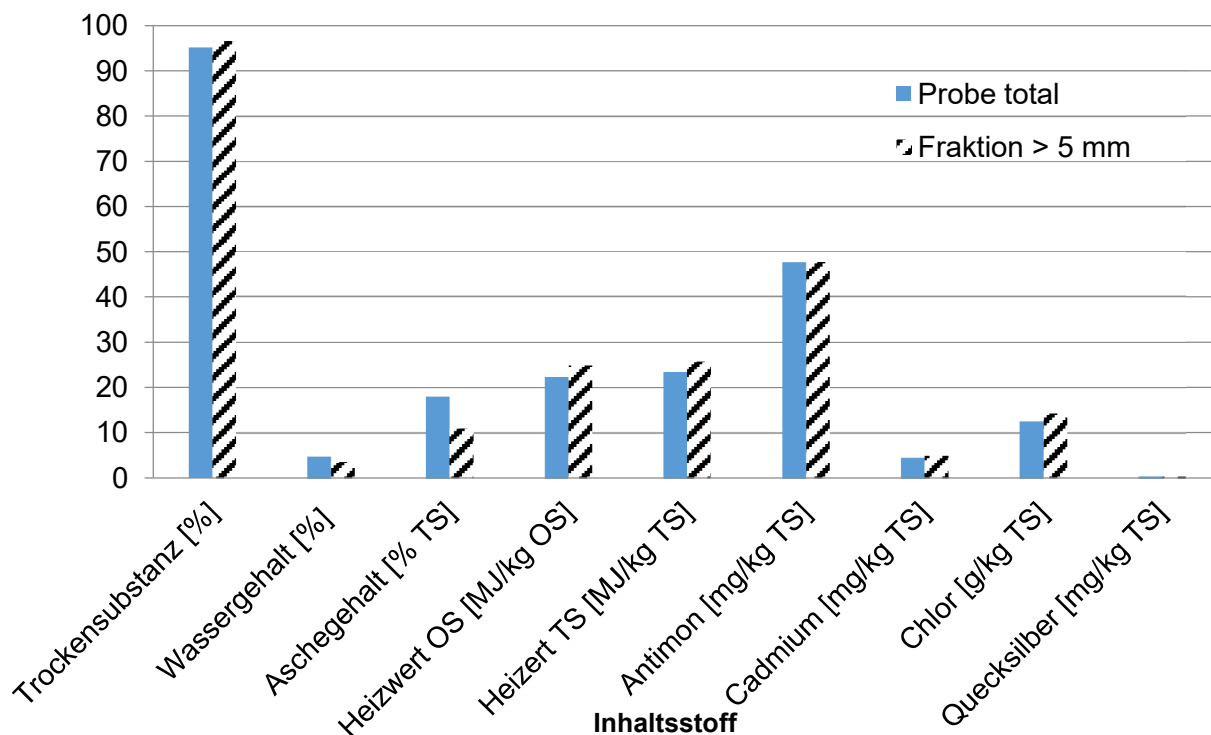


Abbildung 55: Verteilung der Parameter, chemisch-physikalische Ergebnisse aus Kleinversuchen

Durch eine Abtrennung der Feinfraktion ergeben sich überwiegend Verbesserungen aber auch marginale Einbußen bei der Qualität des Ersatzbrennstoffs. Eine positive Entwicklung ist bei den Parametern Trockensubstanz, Wassergehalt, Aschegehalt, den Heizwerten und Quecksilber zu beobachten.

Auffallend ist, dass sich die Verbrennungseigenschaften im Ganzen positiv entwickeln. Die Steigerung der Trockensubstanz mit 1,3% fällt relativ gering aus und wird sich in den Verbrennungseigenschaften weniger auswirken. Die Reduktion des Wasser- (26,5%) und

Aschegehalts (38,4%) hingegen wird den Abbrand zu seinem Vorteil beeinflussen. Der Heizwert erfahren eine Steigerung um je 11,4% (Heizwert OS) und 10,3% (Heizwert TS).

Positiv zu bemerken ist die Reduktion von Quecksilber um 12,5%, eine Veränderung bei der Konzentration von Antimon ist nicht zu beobachten.

Cadmium und Chlor sind die einzigen zwei Parameter, die keine positive Entwicklung zeigen. Die Steigerungen um 7,6 bzw. 14,7% sind durch eine größere Menge an folienähnlichem Material im EBS PREMIUM Quality neu zu erklären. In diesem Material ist mehr PVC enthalten, in dem neben Chlor auch Cadmium als Stabilisator und Farbmittel eingesetzt wird. [4, S. 587.f]

Beeinflussung der Verbrennungseigenschaften

Durch die Abtrennung der Feinfraktion und eine nachfolgende Zerkleinerung der Grobfraktion stellen sich Verbesserungen der Verbrennungseigenschaften des Ersatzbrennstoffs ein. Wie aus der folgenden Grafik ersichtlich verändert sich die Korngrößenverteilung des Materials. Der Trend ist hin zu einer engeren Verteilung die sich hauptsächlich auf die Maschenweiten < 10, < 5 und < 2 mm beschränken. Das bedeutet, dass eine Vergrößerung der Oberfläche gegeben ist und somit ein schnellerer Ausbrand des Materials stattfinden kann.

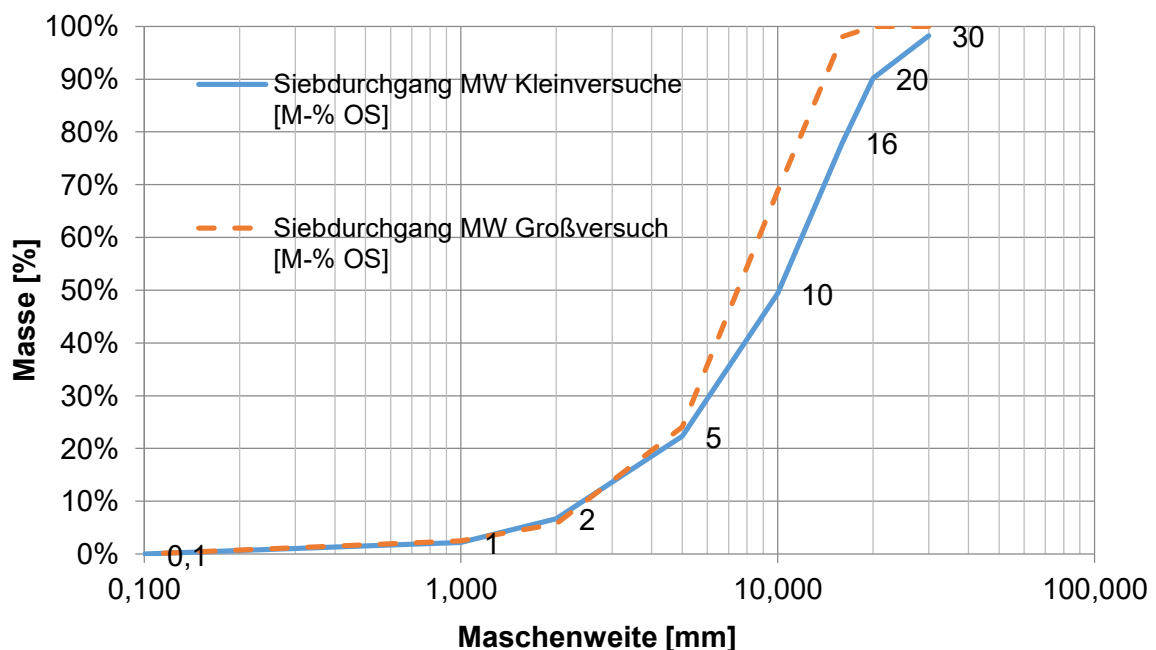


Abbildung 56: Vergleich zwischen Kleinversuch (EBS PREMIUM Quality) und Großversuch (EBS PREMIUM Quality neu, hergestellt nach zusätzlicher Siebung (5 mm) und Zerkleinerung)

7 Technisch-wirtschaftliche Planung der großtechnischen Umsetzung

Die Ergebnisse der Untersuchungen und daraus gewonnenen Erkenntnisse sollen die Grundlage für eine technisch-wirtschaftliche Planung einer großtechnischen Umsetzung am Standort Retznei darstellen. Es werden zwei Szenarien betrachtet die bei einer Realisierung in Betracht kommen, Szenario A und Szenario B. Diese werden nachfolgend beschrieben.

Szenario A:

Das Szenario A umfasst eine Siebung des EBS PREMIUM Quality und somit eine Aufteilung in eine hochkalorische EBS PREMIUM Quality neu und mittelkalorische Feinfraktion. Auf eine Zerkleinerung des EBS neu wird verzichtet. Der Trennschnitt soll wie auch schon in den Untersuchungen bei 5 mm liegen. Die nachfolgende Abbildung 57 zeigt die Prozessergänzungen.

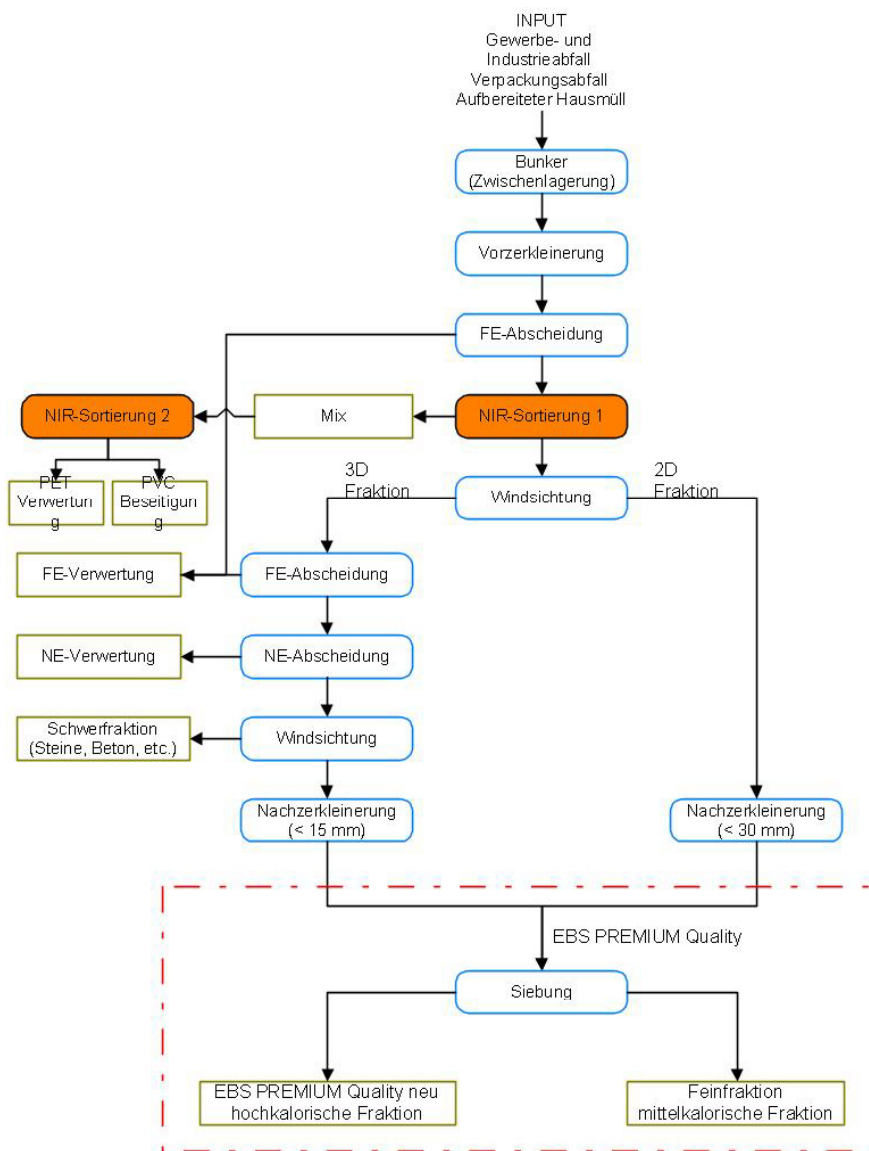


Abbildung 57: Szenario A

Szenario B

Im Szenario B wird der EBS PREMIUM Quality neu einem weiteren Zerkleinerungsschritt unterzogen. Diese zusätzliche Aufbereitung steigert abermals die Verbrennungseigenschaften des EBS. Die unten angeführte Grafik zeigt den zusätzlichen Aufbereitungsschritt. (siehe Abbildung 58)

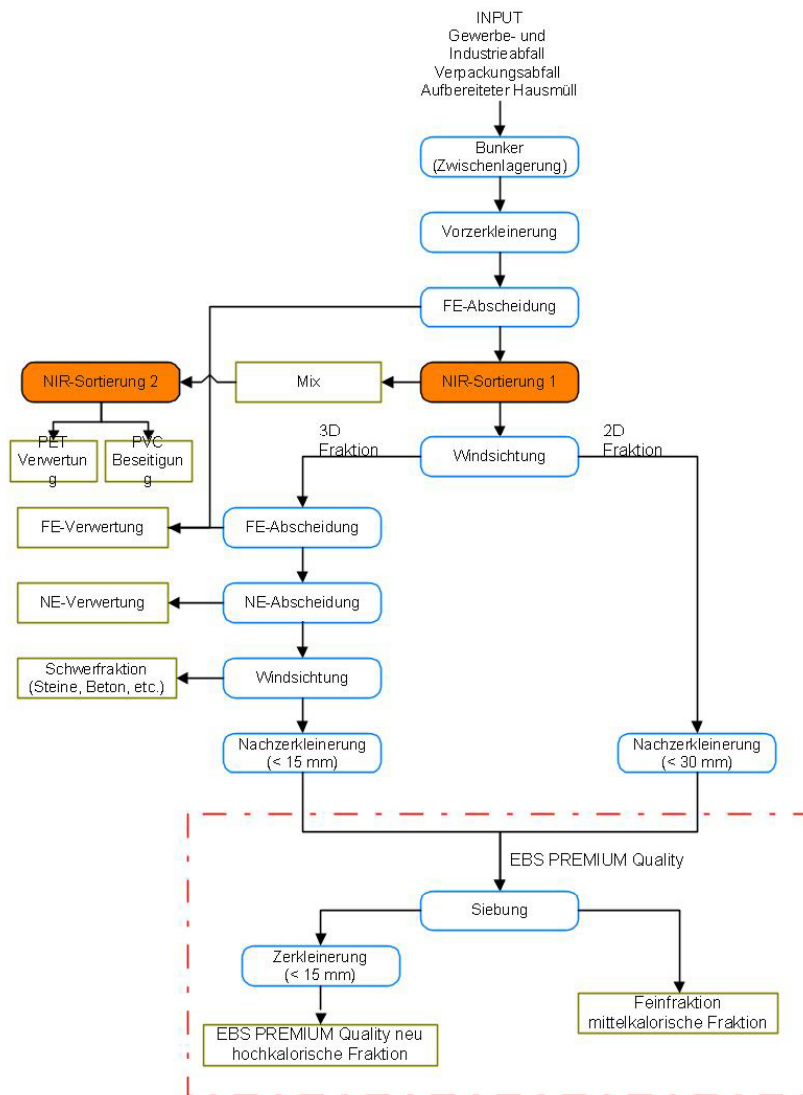


Abbildung 58: Szenario B

Nach der Besprechung mit dem zuständigen Bauingenieur, der die Anlage bei ThermoTeam entworfen und realisiert hat, kam es zu dem Entschluss, dass Szenario B verworfen wird, da sich eine Umsetzung wirtschaftlich nicht positiv darstellen würde. Szenario A hingegen kann sowohl aus wirtschaftlichen Gründen, also auch vom Platzangebot vor Ort weiter verfolgt werden.

Die unten angeführte Auflistung (vgl. Tabelle 46) der Kosten ist eine Abschätzung für den Umbau der Anlage in der Retznei.

Tabelle 46: Kosten für die Erweiterung der Anlage ThermoTeam gem. Szenario A

Fördertechnik		
Einheit	Kosten [€]	
H201 Wellkantenförderer	95.000	
H203 Rollengurtförderer	14.000	
H204 Rollengurtförderer	29.500	
H205 Rollengurtförderer	14.000	
H206 Rollengurtförderer	17.000	
H207 Rollengurtförderer	34.500	
H208 Rollengurtförderer	58.000	
Umbau Bestand	45.000	
Gesamtkosten Fördertechnik [€]		307.000
Maschinentechnik und Stahlbau		
Einheit	Kosten [€]	
F202 Spannwellensieb	90.000	
Stahlbau	25.000	
Gesamtkosten Maschinentechnik und Stahlbau [€]		115.000
Elektroinstallationen		
Einheit	Kosten [€]	
Elektroinstallationen	40.000	40.000
Bautechnik		
Einheit	Kosten [€]	
Bautechnik	90.000	90.000
Allgemeine Kosten		
Einheit	Kosten [€]	
Allgemeine Kosten	25.000	25.000
Gesamtkosten für den Umbau [€]		577.000

Die Summe der Umbauten würden somit **577.000** Euro betragen.

Die nachfolgende Abbildung 59 zeigt den Umbau grafisch ausgeführt. Die rotmarkierten Anlagenteile sind die Erweiterungen, die durch die Arbeiten erfolgen würden

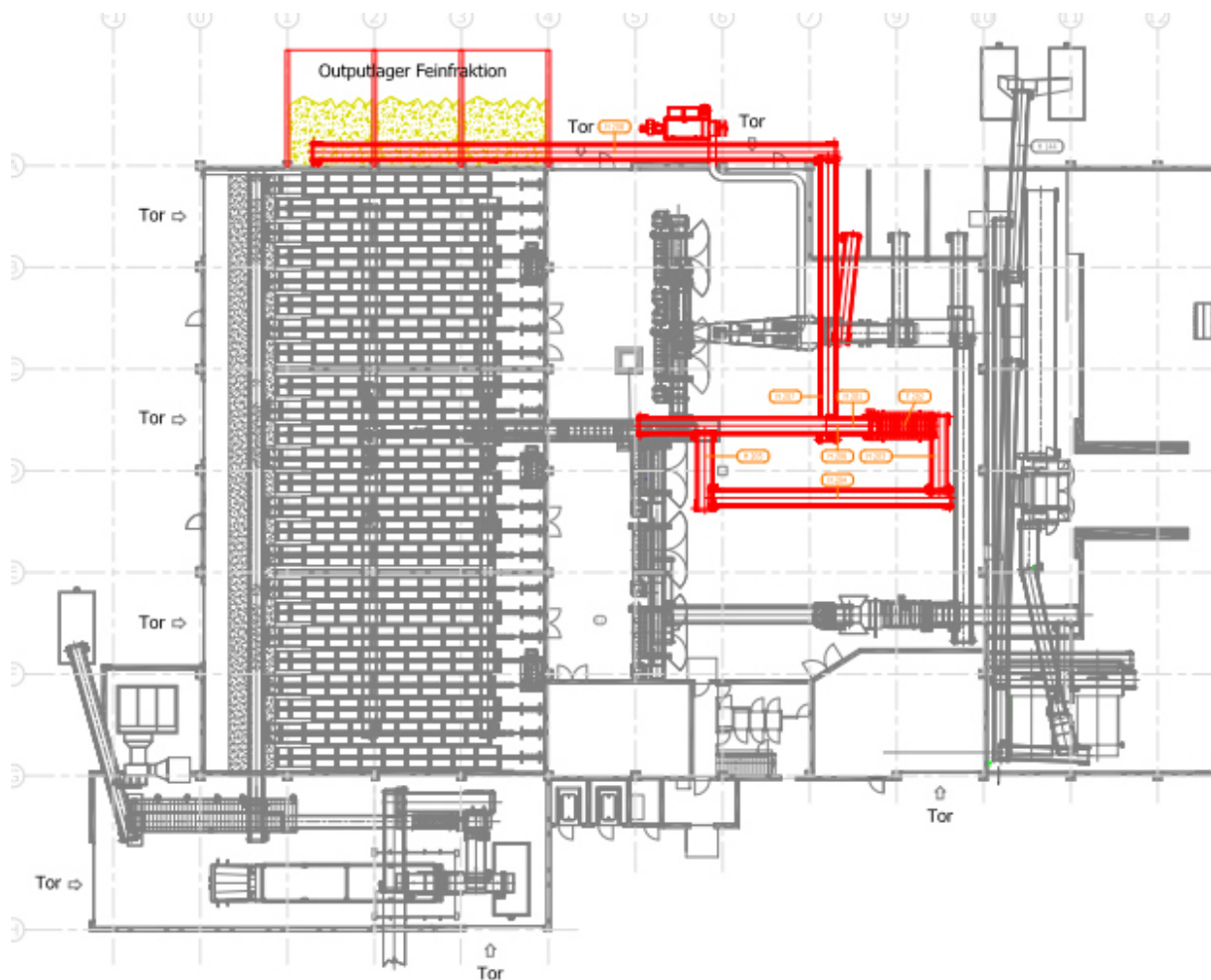


Abbildung 59: grafische Umsetzung des Umbaus

Aus technischer Sicht ist der Umbau der Anlage durchführbar, da genug Raum zu Verfügung steht und so die Funktionsweise einwandfrei gegeben wäre.

Im Falle einer Abschreibung der o. a. Investitionssumme von 577.000 € auf zwei bis fünf Jahre und unter der Berücksichtigung der durchschnittlichen Jahresproduktion von 80.000 t ergeben sich zum derzeitigen Betrieb zusätzliche Kosten (ohne Berücksichtigung der Betriebskosten) in der Höhe von 3,60 €/t EBS (zwei Jahre) und 1,50 €/t EBS (fünf Jahre).

Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit werden die Ergebnisse und die potentielle Umsetzung intern noch diskutiert.

8 Zusammenfassung

Ersatzbrennstoffe sind Abfälle, im Ganzen Umfang oder zu einem relevanten Ausmaß für die Energiegewinnung eingesetzt werden und die Vorgaben der Abfallverbrennungsverordnung erfüllen. Es befassen sich mehrere Unternehmen in Österreich mit der Herstellung von Ersatzbrennstoffen. Einer davon ist der Kooperationspartner dieser Arbeit die Firma ThermoTeam Alternativbrennstoff GmbH. Ziel dieser Zusammenarbeit ist den Ersatzbrennstoff „ESB PREMIUM Quality“, der am Standort Retznei hergestellt wird, zu untersuchen und neu zu bewerten. Die Überlegungen waren den EBS in eine Fein- und Grobfraction aufzuteilen um ein neues Produkt namens „ESB PREMIUM Quality neu“ zu erlangen. Weiters sind chemisch-physikalische Untersuchungen durchgeführt worden um Daten für eine großtechnische Umsetzung zu erhalten.

Das Unternehmen ThermoTeam ist ein Joint-Venture der Saubermacher Dienstleistungs-Aktiengesellschaft (AG) und Lafarge Perlmöser. Seit 2003 wird an dem Standort qualitativ hochwertiger Ersatzbrennstoff erzeugt, der Großteils in der Zementindustrie seinen Einsatz findet. Der angelieferte Abfall wird am Standort mehreren Zerkleinerungsvorgängen und Sortierstufen unterzogen, bis die gewünschte Qualität erreicht und an die nachfolgenden energetischen Verwertungslösungen angepasst ist.

Um Ersatzbrennstoffe untersuchen zu können, ist es notwendig Proben des Materials zu nehmen. Dies muss repräsentativ und nachvollziehbar geschehen. Die rechtlichen Grundlagen für Ersatzbrennstoffe und die Probenahme selbiger sind die Abfallverbrennungsordnung und die darin vorgeschriebene ÖNORM EN 15442. Diese Literatur gibt den Verfahrensablauf bezüglich der Probenahme genau vor und wurde in dieser Arbeit auch angewandt. Nach der Planungsphase haben sich fünf Probetage ergeben, an denen fünf Kleinversuche und ein Großversuch durchgeführt wurden.

An den Tagen der Kleinversuche wurden jeweils zwei qualifizierten Stichproben zu je 5 kg hergestellt, die jeweils aus zehn Einzelproben zu je 0,5 kg bestanden. Diese QSTP sind einer Siebanalyse unterzogen worden, um die Verteilung der Korngrößen und Massen zu erhalten. Danach erfolgte eine Weitergabe der Fein- (≤ 5 mm) und Grobfraction (> 5 mm) an das Labor zwecks chemischer Untersuchungen. Der Großversuch beinhaltete die Probenahme von ca. 450 kg Material, welches vor Ort weiter aufbereitet wurde. Es erfolgte eine Abtrennung der Fraktion ≤ 5 mm, die anschließend verworfen wurde. Das Grobgut (d. h. ESB PREMIUM Quality neu) erfuhr einen weiteren Zerkleinerungsschritt in der Anlage. Das neu aufbereitete Material wurde wieder beprobt, einer Siebanalyse unterzogen und chemisch umfangreich untersucht.

Die Untersuchungen zeigten Ungereimtheiten in den Massenverteilungen diverser Proben. Nach einer ausführlichen Analyse konnte das Problem auf die Probenahmeschleuse eingegrenzt werden. Eine genauere Untersuchung brachte eine Schwäche in der Konstruktion zum Vorschein. Da die Schleuse nachträglich in die Förderapparatur eingebaut wurde, konnte nur mit dem bestehenden Material gearbeitet werden. Man entschied sich

eine Öffnung in den Boden der Fördereinheit zu schneiden und dies mit einer pneumatisch gesteuerten Platte abzudecken. Durch diese Art der Konstruktion kommt es allerdings zu einem Freiraum zwischen dem Tragkettenförderer und der Verschlussplatte und somit zu einer Ablagerung des feinen Materials in diesem Freiraum.

Da dieser Umstand die Proben verfälscht hat, war es notwendig weitere Proben herzustellen. Dies geschah an einem sechsten Versuchstag an dem gleich 4 QSTP erzeugt wurden. Die nachfolgenden Siebanalysen zeigten die erwarteten Verteilungen der Masse und so konnten die Bewertungen und Betrachtungen weiter ausgeführt werden.

Die Siebanalysen zeigten eine mittlere Verteilung der Fraktionen von 20,6% Feingut und 79,4% Grobgut bzw. EBS PREMIUM Quality neu. Bezieht man nun diese Werte auf die Jahresmenge des EBS PREMIUM Quality, so könnte man ca. 63.500 t „EBS PREMIUM Quality neu“ erzeugen.

Ein weiterer Punkt in dieser Arbeit war es eine Abtrennung der Feinfraktion hinsichtlich der Verbesserung der qualitativen Eigenschaften des Ersatzbrennstoffs zu untersuchen. Durch ein Aufteilen in die beiden Fraktionen ergeben sich überwiegend Verbesserungen der Qualität. Es ist eine positive Entwicklung bei den Parametern Trockensubstanz, Wassergehalt, Aschegehalt, den Heizwerten und Quecksilber zu beobachten. Einzig zwei Inhaltstoffe zeigen keinen positiven Trend. Der Chlor- und Cadmiumgehalt steigt durch die Abtrennung der Feinfraktion.

Diese Ergebnisse zeigen, dass das angedachte Verfahren eine Verbesserung der Qualität nach sich zieht. Eine technisch-wirtschaftliche Planung einer großtechnischen Umsetzung war die logische Konsequenz. Es wurden zwei Szenarien näher betrachtet, wobei aber dem weniger aufwendigen der Vorzug gegeben wurde. Ausschlaggebend war die Tatsache, dass die Hauptkunden des Unternehmens dazu in der Lage sind, grobes Material zu verwenden. Deshalb entschied man sich eine zusätzliche Zerkleinerungsstufe einzusparen und nur die Abtrennung des Feinguts planerisch zu untersuchen. Die Investitionskosten für die großtechnische Umsetzung würden sich auf 577.000 € belaufen.

Als Fazit lässt sich feststellen, dass eine zusätzliche Siebung und Zerkleinerung des Ersatzbrennstoffs eine Verbesserung der Qualität mit sich bringt. Über die Umsetzung wurde, zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit, intern noch diskutiert.

9 Verzeichnisse

9.1 Literatur

- [1] BGBl. II Nr. 389/2002. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und des Bundesministers für Wirtschaft, Familie und Jugend über die Verbrennung von Abfällen (Abfallverbrennungsverordnung - AVV).
- [2] Lorber, K.E., Sarc, R. & Aldrian, A.: Design and quality assurance for solid recovered fuel. In: Waste Management & Research 30 (4). DOI: 10.1177/0734242X12440484. S. 370-380, 2012.
- [3] Pomberger, R. & Sarc, R.: The future of solid recovered fuels (SRF). In: Rohstoffe sind Zukunft / Raw Materials are the Future; Band 2 Eumicon – European Mineral Resources Conference 2012, Montanuniversität Leoben, Austria. ISBN: 978-3-901074-35-6. S. 387-408, 2012.
- [4] Sarc R., Lorber KE, Pomberger R., Rogetzer M., Sippl EM.: Design, quality, and quality assurance of solid recovered fuels for substitution of fossil feedstock in the cement industry. In: Waste Management & Research 32 (7). DOI 10.1177/0734242X14536462. S. 565-585, 2014.
- [5] Härdtle G., Ersatzbrennstoffe 1, Herstellung, Lagerung und Verwertung, Neuruppin, Verlag Thomé-Kozmiensky, 2001.
- [6] Mauschitz G.: Emissionen aus Anlagen der Österreichischen Zementindustrie, Wien 2016.
- [7] URL: http://www.thermoteam.at/cms/front_content.php?idart=1&idcat=2&lang=1, Stichwort: Unternehmen bzw. Abfallverwertung, Stand: 17.10.2016.
- [8] Lorber, K.E & Sarc, R.: Waste to Energy by Preparation of Quality Controlled SOLID RECOV-ERED FUELS (SRF). In: Nelles et al. (Hrsg.): Proceedings of the 4th international conference of Environmental Technology and Knowledge Transfer. Hefei, P.R. China, 2012.
- [9] URL: <http://www.l-rt.com/de/produkte/vorzerkleinerer/jupiter/jupiter.html>, Stichwort: Vorzerkleinerung, Stand: 09.10.2016.
- [10] Martens, H.: Recyclingtechnik, Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag, 2011.
- [11] URL: <http://www.ife-bulk.com/de/magnettechnik>, Stichwort: Magnettrommelscheider, Überbandmagnetscheider, Wirbelstromscheider; Stand: 16.11.2016.
- [12] URL: <http://www.westeria.de/windsichter>, Stichwort: Windsichter, Stand: 16.11.2016.
- [13] Lindner M.: Europäische Patentanmeldung, Schwerstoffabscheider, Den Haag, 2006.

- [14] URL: http://www.westeria.de/windsichter/windsichter_ws2.php?lang=de, Stichwort: Windsichter, Stand: 17.10.2016.
- [15] Kreindl, G.: Herausforderungen der NIR-Sortierung von gemischten Abfällen aus Industrie und Gewerbe, Leoben 2010.
- [16] http://www.redwave.at/fileadmin/REDWAVE_US/Case_studies, Stichwort: ThermoTeam, NIR, Stand: 16.11.2016.
- [17] URL: <http://www.l-rt.com/de/produkte/vorzerkleinerer/jupiter/jupiter.html>, Stichwort: Nachzerkleinerung, Stand: 09.10.2016.
- [18] Austrian Standards Institute/Österreichisches Normungsinstitut (ON) (Hrsg.): ÖNORM EN 15442. Feste Sekundärbrennstoffe - Verfahren zur Probenahme. Wien: Austrian Standards Institute 2011.
- [19] Gespräch mit Kulmer J., Betriebsleiter ThermoTeam, 2.11.2016, Retznei.
- [20] Sarc R., Pomberger R, Eferdinger S.: „REUQ-Ausweis“ für EBS Entwicklung eines Ressourcen-, Energie-, Umwelt-, Qualitätsausweises (REUQ) für Ersatzbrennstoffe (EBS), Verband Österreichischer Entsorgungsbetriebe (VÖEB), Wien, 2015.
- [21] Gespräch mit Kulmer j., Betriebsleiter ThermoTeam, Retznei, 18.10.2016.

9.2 Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
AG	Aktiengesellschaft
AG	Aschegehalt
ARA	Altstoff Recycling Austria
ARGE	Arbeitsgemeinschaft
AVV	Abfallverbrennungsverordnung
bzw.	beziehungsweise
bzw.	beziehungsweise
Cl	Chlor
Cu	Kupfer
d ₀₅	Nominelle Siebgröße eines Partikels (Massenanteil von 5% der Partikel ist kleiner als d ₉₅)
d ₉₅	Nominelle Siebgröße eines Partikels (Massenanteil von 95% der Partikel ist kleiner als d ₉₅)
EBS	Ersatzbrennstoff
EN	Europa Norm
FE	Eisen
ff.	folgende

g	Gramm
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
Hg	Quecksilber
Hu OS	Heizwert Originalsubstanz
Hu TS	Heizwert Trockensubstanz
kg	Kilogramm
kg/h	Kilogramm pro Stunde
kg/m ³	Kilogramm pro Kubikmeter
KV	Kleinversuch
m ³	Kubikmeter
MBA	mechanisch biologische Aufbereitung
mm	Millimeter
NE	Nichteisen
Ni	Nickel
ÖNORM	Österreichische Norm
OS	Originalsubstanz
PET	Polyethylenterephthalat
PVC	Polyvinylchlorid
QSTP	qualifizierte Stichprobe
RDF	Refuse Drived Fuel
S.	Seite
Sd	Antimon
t	Tonnen
t/a	Tonnen pro Jahr
TS	Trockensubstanz
u.a.	unter anderem
USA	United States of America
vgl.	vergleich

9.3 Tabellen

Tabelle 1: Firmengeschichte ThermoTeam [7]	7
Tabelle 2: Magnetische Eigenschaften von Werkstoffen [10, S. 28]	10
Tabelle 3: Anzahl der Einzelproben	17
Tabelle 4: Werte der exemplarischen Berechnung	18
Tabelle 5: Werte zur Berechnung der Mindestmenge einer Stichprobe	18
Tabelle 6: Zusammenfassung des Probenumfangs der Kleinversuche.....	21
Tabelle 7: Zusammenfassung des Probenumfangs des Großversuchs	21
Tabelle 8: Zusammenfassung des Probenumfangs des zerkleinerten Materials.....	22
Tabelle 9: Probenahmetage	23

Tabelle 10: Kleinversuch 1 - Massenbilanz.....	25
Tabelle 11: Kleinversuch 2 - Massenbilanz.....	27
Tabelle 12: Kleinversuch 3 - Massenbilanz.....	28
Tabelle 13: Kleinversuch 4 - Massenbilanz.....	30
Tabelle 14: Kleinversuch 5 - Massenbilanz.....	31
Tabelle 15: Großversuch - Entnahmemengen Einzelproben der Großprobe	33
Tabelle 16: Großversuch - Schüttdichten der betrachteten Fraktionen	35
Tabelle 17: Kleinversuch 1 - Korngrößenverteilung	37
Tabelle 18: Kleinversuch 2 - Korngrößenverteilung	39
Tabelle 19: Kleinversuch 3 - Korngrößenverteilung	40
Tabelle 20: Kleinversuch 4 - Korngrößenverteilung	41
Tabelle 21: Kleinversuch 5 - Korngrößenverteilung	42
Tabelle 22: Kleinversuch 5 - Siebanalyse - Teil 2	43
Tabelle 23: Kleinversuch 6 - Siebanalyse QSTP 1	44
Tabelle 24: Kleinversuch 6 - Siebanalyse QSTP 2	45
Tabelle 25: Kleinversuch 6 - Siebanalyse QSTP 3	46
Tabelle 26: Kleinversuch 6 - Siebanalyse QSTP 4	47
Tabelle 27: Großversuch - Korngrößenverteilung der Probe 1.....	48
Tabelle 28: Großversuch - Korngrößenverteilung der Probe 2.....	49
Tabelle 29: Großversuch - Korngrößenverteilung der Probe 3.....	50
Tabelle 30: Großversuch - Korngrößenverteilung der Probe 4.....	51
Tabelle 31: Großversuch - Korngrößenverteilung der Probe 5.....	52
Tabelle 32: Ausgewählte Grenzwerte für Ersatzbrennstoffe in der Zementindustrie (Auszug) [1, S. 34].....	53
Tabelle 33: Kleinversuch 1 - Ergebnisse aus chemischen Analysen.....	53
Tabelle 34: Kleinversuch 2 - Ergebnisse aus chemischen Analysen.....	54
Tabelle 35: Kleinversuch 3 - Ergebnisse aus chemischen Analysen.....	54
Tabelle 36: Kleinversuch 4 - Ergebnisse aus chemischen	55
Tabelle 37: Kleinversuch 5 - Ergebnisse aus chemischen Analysen.....	55
Tabelle 38: Kleinversuch 5 - Ergebnisse aus chemischen Analysen - Teil 2.....	56
Tabelle 39: Großversuch – Ergebnisse aus chemischen Analysen - Proben 1-5.....	56
Tabelle 40: Mittlere Massenverteilungen	60

Tabelle 41: Zusammenfassung der chemischen Auswertungen (Mittelwert Kleinversuche) .62	.62
Tabelle 42: Zusammenfassung der chemischen Auswertungen (Mittelwert GV, V5 30 Sekunden sowie QSTP 1-4 des sechsten Versuchstags).....62	.62
Tabelle 43: Gegenüberstellung von vorgeschriebenen Grenzwerten zu den ermittelte Messwerten.....65	.65
Tabelle 44: Vergleich des Trockenrückstands66	.66
Tabelle 45: Verteilung der Parameter, chemisch-physikalischer Ergebnisse aus Kleinversuchen.....72	.72
Tabelle 46: Kosten für die Erweiterung der Anlage ThermoTeam gem. Szenario A.....76	.76

9.4 Abbildungen

Abbildung 1: Aufgabestellen für Ersatzbrennstoffe im Zementwerk 6	6
Abbildung 2: Verteilung des Besitzanteils von ThermoTeam 7	7
Abbildung 3: Herstellung von EBS am Standort ThermoTeam 8	8
Abbildung 4: Schema der Ersatzbrennstoffherstellung ThermoTeam 8	8
Abbildung 5: Welle mit Rotormesser..... 9	9
Abbildung 6: Vorzerkleinerer 9	9
Abbildung 7: Trommelmagnetscheider und ausgeschleuste Fraktion 11	11
Abbildung 8: Überbandmagnetscheider..... 11	11
Abbildung 9: Wirbelstromscheider und ausgeschiedene Fraktion..... 12	12
Abbildung 10: Inertstoffabscheider und abgeschiedene Fraktion..... 12	12
Abbildung 11: Windsichter 13	13
Abbildung 12: Nahinfrarotsortierung 14	14
Abbildung 13: Erforderliche Elemente zur Aufstellung eines Probenahmeplans [18, S. 14]..16	16
Abbildung 14: Schemata Kleinversuch (links) und Großversuch (rechts).....20	20
Abbildung 15: Automatische Entnahmevorrichtung am Standort ThermoTeam22	22
Abbildung 16: Aufgabematerial Versuch 2.....23	23
Abbildung 17: Detailansicht Aufgabematerial Versuch 2.....24	24
Abbildung 18: Kleinversuch 1 - Massenflüsse (in kg/h).....26	26
Abbildung 19: Kleinversuch 2 - Massenflüsse (in kg/h).....27	27
Abbildung 20: Kleinversuch 3 - Massenflüsse (in kg/h).....29	29
Abbildung 21: Kleinversuch 4 bzw. Großversuch - Massenflüsse (in kg/h)30	30
Abbildung 22: Kleinversuch 5 - Massenflüsse (in kg/h).....32	32

Abbildung 23: Probenahme Großversuch.....	33
Abbildung 24: Grobfraction (links) Feinfraction (rechts)	34
Abbildung 25: Aufgabe des beprobten Materials in Siebmaschine	34
Abbildung 26: Großversuch - Massenverteilung zwischen Fein- und Grobgut	35
Abbildung 27: Für die Siebanalysen verwendete Plansiebmaschine	36
Abbildung 28: Kleinversuch 1 - Körnungssummenkurve.....	37
Abbildung 29: Grafische Bestimmung von d_{95}	38
Abbildung 30: Grafische Bestimmung von d_{05}	38
Abbildung 31: Kleinversuch 2 - Körnungssummenkurve.....	39
Abbildung 32: Kleinversuch 3 - Körnungssummenkurve.....	40
Abbildung 33: Kleinversuch 4 - Körnungssummenkurve.....	41
Abbildung 34: Kleinversuch 5 - Körnungssummenkurve.....	42
Abbildung 35: Kleinversuch 5 - Kornsummenkurve - Teil 2.....	43
Abbildung 36: Kleinversuch 6 - Körnungssummenkurve QSTP 1	44
Abbildung 37: Kleinversuch 6 - Körnungssummenkurve QSTP 2	45
Abbildung 38: Kleinversuch 6 - Körnungssummenkurve QSTP 3	46
Abbildung 39: Kleinversuch 6 - Körnungssummenkurve QSTP 4	47
Abbildung 40: Körnungssummenkurve der Probe 1.....	48
Abbildung 41: Großversuch - Körnungssummenkurve der Probe 2	49
Abbildung 42: Großversuch - Körnungssummenkurve der Probe 3	50
Abbildung 43: Großversuch - Körnungssummenkurve der Probe 4	51
Abbildung 44: Großversuch - Körnungssummenkurve der Probe 5	52
Abbildung 45: Massenverteilung in den Kleinversuchen (Proben 1-5).....	57
Abbildung 46: Massenverteilung im Großversuch (Proben 1 - 5).....	58
Abbildung 47: Verteilung Großversuch	58
Abbildung 48: Vergleich der Massenverteilungen der Kleinversuche (1 – 5) und zusätzlicher Versuch 30 sec.	59
Abbildung 49: Kleinversuche – Zusammenfassung der Transferkoeffizienten (bezogen auf den Mittelwert der Verteilungen aus V1, V2, V3, V4, V5).....	63
Abbildung 50: Großversuch inkl. ergänzende Untersuchungen- Zusammenfassung der Transferkoeffizienten (bezogen auf den Mittelwert der Verteilungen aus Großversuch, V5 30 Sekunden sowie QSTP 1-4 des sechsten Versuchstags).....	64
Abbildung 51: Skizze Probenahmeschleuse (Seitenansicht)	68

Abbildung 52: Probenahmeschleuse im geschlossenen Zustand	69
Abbildung 53: Probenahmeschleuse im offenen Zustand	69
Abbildung 54: Probenahmeschleuse Detailansicht	70
Abbildung 55: Verteilung der Parameter, chemisch-physikalische Ergebnisse aus Kleinversuchen.....	72
Abbildung 56: Vergleich zwischen Kleinversuch (EBS PREMIUM Quality) und Großversuch (EBS PREMIUM Quality neu, hergestellt nach zusätzlicher Siebung (5 mm) und Zerkleinerung)	73
Abbildung 57: Szenario A	74
Abbildung 58: Szenario B	75
Abbildung 59: grafische Umsetzung des Umbaus	77

Anhang

Probenahmeprotokoll des ersten Versuchstags (29. 06. 2016)

Seite 12
ONORM S 2123-1

Anhang A (normativ): Probenahmeprotokoll

Protokoll zur Probenahme von Abfällen

Prot. Nr.:	Projektbezeichnung:
1	Praktische Untersuchung der Feinfraktion von „EBS PREMIUM Quality“ und technisch-wirtschaftliche Planung einer großtechnischen Umsetzung

Vorerhebungen:

Auftraggeber: Thermo Team Alternativbrennstoffverwertungs GmbH
Abfallbesitzer: Thermo Team Alternativbrennstoffverwertungs GmbH
Abfallbesitzernummer:
Ansprechpartner:

Informationen über Art und Herkunft des Abfalls

Abfallart	Abfallcode/Schlüsselnummer: 93 108 Bezeichnung: Aufbereiteter Substitut Brennstoff Zusatzbemerkung:
Ersatzbrennstoff	
Ort der Probenahme (zB Adresse, Fahrzeug)	Thermo Team Alternativbrennstoffverwertungs GmbH Retznei 34 8461 Retznei Ehrenhausen
Geschichte des Abfalls – Herkunft bzw. kurze Beschreibung des Produktionsprozesses, bei dem der Abfall anfällt, kurze Angaben zu den vermuteten Verunreinigungen	
<p>ASB Durchlauf aus der Ersatzbrennstoffproduktionsanlage der Fa. Thermo Team in Retznei</p> <p>Prozessschritte:</p> <ul style="list-style-type: none"> .) Vorzerkleinerung .) 2 stufige NIR Anlage .) Windsichter (Aufteilung in Leicht- und Schwerfraktion) .) Leichtfraktion: 2D Shredder Zerkleinerung .) Schwerfraktion: FE-, NE und Inertstoffabscheidung, 3D Zerkleinerung .) Zusammenführung der Linien .) Produkt ASB Durchlauf 	
Homogenität	<input type="checkbox"/> ja Begründung gemäß Abschnitt 5.2 <input type="checkbox"/> nein

Seite 14
ONORM S 2123-1

Beschreibung und Charakteristik der qualifizierten Stichproben
(je qualifizierter Stichprobe ist eine Spalte auszufüllen)

1. Probenbezeichnung: 1 qual. STP	2. Probenbezeichnung: 2 qual. STP	... Probenbezeichnung:	n. Probenbezeichnung:
räumliche Zuordnung zur Entnahmestelle oder zu einem Einzelgebäude gemäß Probenahmeskizze:	räumliche Zuordnung zur Entnahmestelle oder zu einem Einzelgebäude gemäß Probenahmeskizze:	räumliche Zuordnung zur Entnahmestelle oder zu einem Einzelgebäude gemäß Probenahmeskizze:	räumliche Zuordnung zur Entnahmestelle oder zu einem Einzelgebäude gemäß Probenahmeskizze:
Tiefenstufe:	Tiefenstufe:	Tiefenstufe:	Tiefenstufe:
<input type="checkbox"/> qualifizierte Stichprobe aus 10 Stichproben	<input type="checkbox"/> qualifizierte Stichprobe aus 10 Stichproben	<input type="checkbox"/> qualifizierte Stichprobe aus Stichproben	<input type="checkbox"/> qualifizierte Stichprobe aus Stichproben
Menge: 5 kg	Menge: 5 kg	Menge: kg	Menge: kg
Farbe:	Farbe:	Farbe:	Farbe:
Geruch: <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	Geruch: <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	Geruch: <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	Geruch: <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
nach:	nach:	nach:	nach:
Konsistenz:	Konsistenz:	Konsistenz:	Konsistenz:
homogen: <input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein	homogen: <input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein	homogen: <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	homogen: <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Korngröße: von 0,1 mm bis 30 mm	Korngröße: von 0,1 mm bis 30 mm	Korngröße: von cm bis cm	Korngröße: von cm bis cm

Voruntersuchungen und Beobachtungen

<input type="checkbox"/> Gasentwicklung	<input type="checkbox"/> Gasentwicklung	<input type="checkbox"/> Gasentwicklung	<input type="checkbox"/> Gasentwicklung
<input type="checkbox"/> Reaktionen	<input type="checkbox"/> Reaktionen	<input type="checkbox"/> Reaktionen	<input type="checkbox"/> Reaktionen
<input type="checkbox"/> Sonstiges:	<input type="checkbox"/> Sonstiges:	<input type="checkbox"/> Sonstiges:	<input type="checkbox"/> Sonstiges:
Bemerkungen (zB Feststellung von vermuteten Kontaminationen):			

Beschreibung der Herstellung der Sammelprobe bzw. der Feldprobe

Angabe aus welchen qualifizierten Stichproben in welcher Art die Sammelprobe(n) bzw. Feldprobe(n) hergestellt wurden;
Probenbezeichnung der Sammelprobe bzw. der Feldprobe

-


Datum und Unterschrift des Probenehmers:

29. 06. 2016
DI (FH) Josef Adam
Georg Bohrn

Probenahmeprotokoll		Datum:	Mittwoch, 29. 06. 2016
		Uhrzeit:	Beginn: 07:13 Ende: 16:30
		Ort:	Ehrenhausen, Retznei
Betreff:	Versuch 1 Probenahme EBS	Inhalt:	Probenahme EBS
Teilnehmer:	Georg Bohrn DI (FH) Josef Adam		
<u>Vorgehen:</u>			
<ul style="list-style-type: none"> • Herstellung 2 qualifizierter Stichproben • 1 Stichprobe besteht aus 10 Proben • Proben werden im Abstand von 1 Stunde genommen 			
<u>Ausrüstung/Material:</u>			
<ul style="list-style-type: none"> • Probenbehälter: Müllsäcke • Waage • Auffangbehälter • Entnahmestation, pneumatisch gesteuert 			
<u>Inputmaterial:</u>			
ARA, vorsortiert, Graz			
Form: Ballen			
Anlagenvorbereitung:			
<ul style="list-style-type: none"> • Anlage ist leer gefahren • Boxen (FE, NE, PET, PVC) sind leer • Definiertes Aufgabematerial 			
Anlieferungsnummer		Menge [t]	
1418 0 694		23,54	
1418 0 837		19,66	
1418 0 757		13,84	
1418 0 755		16,36	
1418 0 824		23,98	
1418 0 778		23,54	
1418 0 856		24,02	
Summe:		144,94	

Aufzeichnung:			
1. Qualifizierte Stichprobe			
Teilprobe	Entnahmezeit	Entnahmemenge [g]	Anmerkungen
1	07:26	501	Schwankungen auf der Waage durch Vibrationen
2	08:26	500	
3	09:26	500	Stopfer (3 min) 10:32 (SAS Box entleert) 13:40
4	10:25	500	
5	11:25	500	14:35 15:45
6	12:25	499	
7	13:35	500	16:00 (Windsichter)
8	14:35	500	
9	15:20	500	Intervall- anpassung: durchsatzbedingt
10	16:20	500	
2. Qualifizierte Stichprobe			
1	07:29	501	Siehe oben!
2	08:29	501	
3	09:29	500	
4	10:28	499	
5	11:28	500	
6	12:28	502	
7	13:38	500	
8	14:38	500	
9	15:23	500	
10	16:23	500	

Anhang:

Fotodokumentation:



Abbildung 1: Aufgabe durch Radlader



Abbildung 2: Inputmaterial



Abbildung 3: Geleerte Boxen (FE, NE, Inertmaterial)
Sichtbares Material schon aus Versuchsmaterial ausgesondert.



Abbildung 4: geleerte Boxen (PVC, PET)



Abbildung 5: Austrag Inertmaterial (Versuchsende)



Abbildung 6: Austrag FE-Fraktion (Versuchsende)



Abbildung 7: Detailsicht Fe-Fraktion



Abbildung 8: Detailsicht NE-Fraktion



Abbildung 9: Detailsicht PET



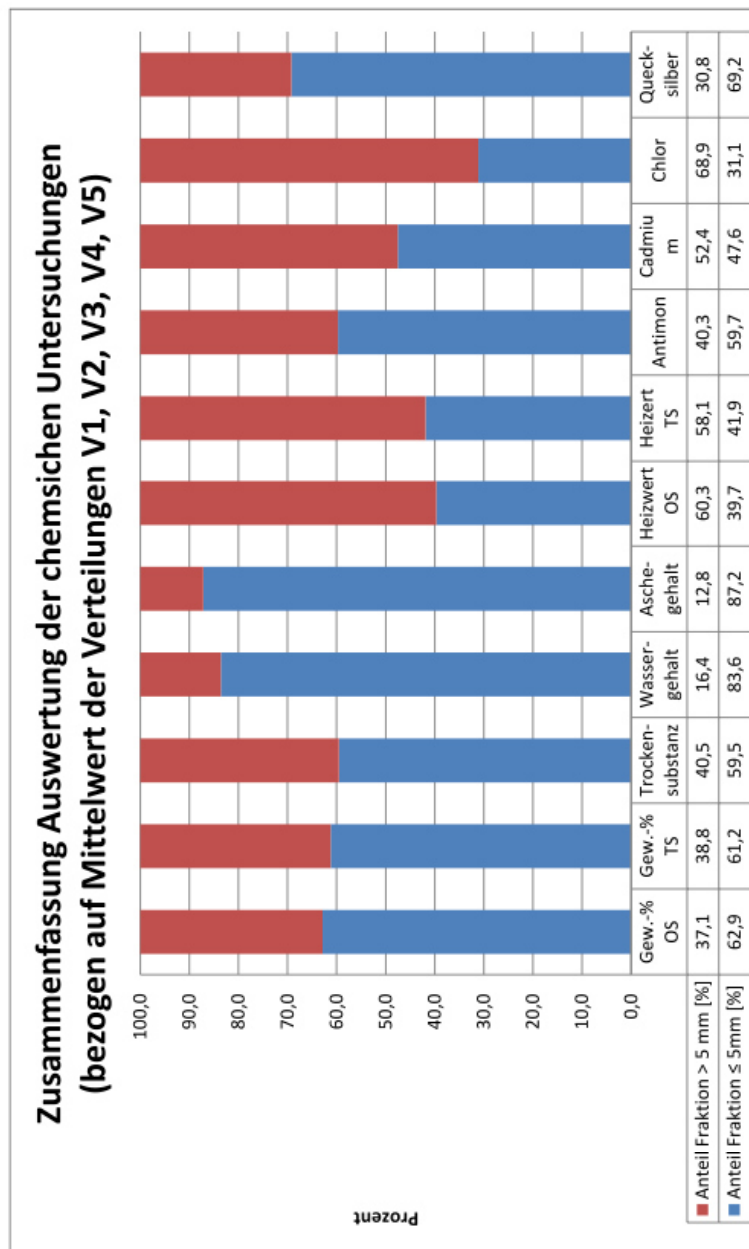
Abbildung 10: Detailsicht PVC

Berechnung der Verteilung der Inhaltstoffe bezogen auf V1-V5

Zusammenfassung Auswertung der chemischen Untersuchungen

(bezogen auf Mittelwert der Verteilungen V1, V2, V3, V4, V5)

Parameter	Bezeichnung	Fraktion ≤ 5 mm	Fraktion > 5 mm	Anteil Fraktion		Knt.
				≤ 5mm [%]	> 5 mm [%]	
Trocken-substanz	TS	89,9	96,5	62,9	Gew.-% OS 37,1	100,0
Wasser-gehalt	WG	10,1	3,5	56,8	Gew.-% TS 36,0	92,9
Asche-gehalt	AG	46,1	11,0	61,2	HR auf 100 38,8	100,0
				Anteil Fraktion	Anteil Fraktion	
				≤ 5mm [%]	> 5 mm [%]	
Heizwert OS	Hu OS	11850,0	24900,0	39,7	60,3	100,0
Heizert TS	Hu TS	13483,3	25900,0	41,9	58,1	100,0
Antimon	Sb	47,7	47,7	59,7	40,3	100,0
Cadmium	Cd	3,1	4,9	47,6	52,4	100,0
Chlor	Cl	4893,3	14266,7	31,1	68,9	100,0
Queck-silber	Hg	0,6	0,3	69,2	30,8	100,0



Versuch 1
29.06.2016

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Probe < 5 mm	Probe > 5 mm	Probe total
Trockensubstanz	TS	[%]	90,6	95,3	92,2
Wassergehalt	WG	[%]	9,4	4,7	7,8
Aschegehalt	AG	[% TS]	55,27	9,38	40,0

Heizwert OS	Hu OS	[kJ/kg OS]	9100	23700	13949,0
Heizert TS	Hu TS	[kJ/kg TS]	10300	24900	15149,0

Antimon	Sb	[mg/kg TS]	43	54	46,7
Cadmium	Cd	[mg/kg TS]	1,4	3,3	2,0
Chlor	Cl	[mg/kg TS]	4480	17100	8671,4
Quecksilber	Hg	[mg/kg TS]	1,5	0,25	1,1

Versuch 1

Anteil Fraktion < 5mm		Anteil Fraktion > 5 mm	Kontrolle
67,9	Gew.-% OS	32,1	100,0
61,5	Gew.-% TS	30,6	92,1
66,8	HR auf 100	33,2	100,0
65,7		34,3	100,0
80,1		19,9	100,0
92,2		7,8	100,0
43,6		56,4	100,0
45,4		54,6	100,0
61,6		38,4	100,0
46,0		54,0	100,0
34,5		65,5	100,0
92,3		7,7	100,0

Versuch 2
05.07.2016

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Probe < 5 mm	Probe > 5 mm	Probe total
Trockensubstanz	TS	[%]	92,9	97,1	94,4
Wassergehalt	WG	[%]	7,1	2,9	5,6
Aschegehalt	AG	[% TS]	53,09	9,25	37,7

Heizwert OS	Hu OS	[kJ/kg OS]	9200	27200	15536,3
Heizert TS	Hu TS	[kJ/kg TS]	10000	28000	16336,3

Antimon	Sb	[mg/kg TS]	33	31	32,3
Cadmium	Cd	[mg/kg TS]	1,8	2,8	2,2
Chlor	Cl	[mg/kg TS]	3940	15500	8009,3
Quecksilber	Hg	[mg/kg TS]	0,4	0,68	0,5

Versuch 2

Anteil Fraktion < 5mm		Anteil Fraktion > 5 mm	Kontrolle
65,8	Gew.-% OS	34,2	100,0
61,1	Gew.-% TS	33,2	94,3
64,8	HR auf 100	35,2	100,0
63,8		36,2	100,0
81,8		18,2	100,0
91,4		8,6	100,0
38,4		61,6	100,0
39,7		60,3	100,0
66,2		33,8	100,0
54,2		45,8	100,0
31,9		68,1	100,0
52,0		48,0	100,0

Versuch 3
13.07.2016

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Probe < 5 mm	Probe > 5 mm	Probe total
Trockensubstanz	TS	[%]	91,9	98,4	94,4
Wassergehalt	WG	[%]	8,1	1,6	5,6
Aschegehalt	AG	[% TS]	50,26	9,84	34,4

Heizwert OS	Hu OS	[kJ/kg OS]	12900	24000	17241,8
Heizert TS	Hu TS	[kJ/kg TS]	14300	24400	18250,6

Antimon	Sb	[mg/kg TS]	27	45	34,0
Cadmium	Cd	[mg/kg TS]	4,9	7,7	6,0
Chlor	Cl	[mg/kg TS]	3040	12800	6857,6
Quecksilber	Hg	[mg/kg TS]	0,31	0,25	0,3

Versuch 3

Anteil Fraktion < 5mm		Anteil Fraktion > 5 mm	Kontrolle
62,5	Gew.-% OS	37,5	100,0
57,4	Gew.-% TS	36,9	94,3
60,9	HR auf 100	39,1	100,0
59,2		40,8	100,0
88,7		11,3	100,0
88,8		11,2	100,0
45,6		54,4	100,0
47,7		52,3	100,0
48,3		51,7	100,0
49,8		50,2	100,0
27,0		73,0	100,0
65,9		34,1	100,0

Versuch 4

27.07.2016

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Probe < 5 mm	Probe > 5 mm	Probe total
Trockensubstanz	TS	[%]	86,1	96	90,0
Wassergehalt	WG	[%]	13,9	4	10,0
Aschegehalt	AG	[% TS]	53,35	20,65	40,3

Heizwert OS	Hu OS	[kJ/kg OS]	7600	24000	14123,3
Heizert TS	Hu TS	[kJ/kg TS]	9200	25100	15524,4

Antimon	Sb	[mg/kg TS]	56	70	61,6
Cadmium	Cd	[mg/kg TS]	3,9	9,9	6,3
Chlor	Cl	[mg/kg TS]	5310	18200	10437,1
Quecksilber	Hg	[mg/kg TS]	0,28	0,25	0,3

Versuch 4

Anteil Fraktion < 5mm		Anteil Fraktion > 5 mm	Kontrolle
62,8	Gew.-% OS	37,2	100,0
54,1	Gew.-% TS	35,7	89,8
60,2	HR auf 100	39,8	100,0
57,6		42,4	100,0
84,0		16,0	100,0
79,6		20,4	100,0
32,4		67,6	100,0
35,7		64,3	100,0
54,8		45,2	100,0
37,4		62,6	100,0
30,6		69,4	100,0
62,9		37,1	100,0

Versuch 5
11.08.2016

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Probe < 5 mm	Probe > 5 mm	Probe total
Trockensubstanz	TS	[%]	90,5	97,8	93,9
Wassergehalt	WG	[%]	9,5	2,2	6,1
Aschegehalt	AG	[% TS]	49,01	10,88	31,2

Heizwert OS	Hu OS	[kJ/kg OS]	11000	20000	15196,2
Heizert TS	Hu TS	[kJ/kg TS]	12400	20400	16130,0

Antimon	Sb	[mg/kg TS]	94	51	74,0
Cadmium	Cd	[mg/kg TS]	4,8	5,4	5,1
Chlor	Cl	[mg/kg TS]	4160	10300	7022,7
Quecksilber	Hg	[mg/kg TS]	0,59	0,25	0,4

Versuch 5

Anteil Fraktion < 5mm		Anteil Fraktion > 5 mm	Kontrolle
55,3	Gew.-% OS	44,7	100,0
50,0	Gew.-% TS	43,7	93,8
53,4	HR auf 100	46,6	100,0
51,4		48,6	100,0
83,2		16,8	100,0
83,8		16,2	100,0
38,6		61,4	100,0
41,0		59,0	100,0
67,8		32,2	100,0
50,4		49,6	100,0
31,6		68,4	100,0
73,0		27,0	100,0