



**ICEBE**  
IMAGINEERING  
NATURE

## DIPLOMARBEIT

# Untersuchung der Klärschlammveraschung für die zukünftige Phosphorrückgewinnung in den Prozessstrukturen eines Zementwerks

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom – Ingenieurs (Dipl. Ing oder DI)

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hermann Hofbauer

Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften

betreut von

Dipl.-Ing. Florian Benedikt

Ing. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Müller

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Markus Pribyl, BSc

Matrikelnummer 01325931

Gerbergasse 46

2000 Stockerau

Wien, Dezember 2019

.....  
Markus Pribyl

## Danksagung

Allen voran möchte ich mich bei Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hermann Hofbauer für die Möglichkeit bedanken, meine Diplomarbeit am Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften schreiben zu dürfen. Dadurch hatte ich die Gelegenheit theoretische Überlegungen im Zuge der Versuchsdurchführung praktisch anzuwenden.

Einen weiteren Dank möchte ich Ing. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Müller aussprechen, der mir bei der jahrelangen Zusammenarbeit immer wieder mit Rat und Tat zu Seite stand und selbst bei vollem Terminkalender immer wieder ein offenes Ohr bei einer Tasse Kaffee hatte. Ebenfalls habe ich sehr geschätzt, dass er an Probleme mit der notwendigen Gelassenheit heranging und immer einen Lösungsweg parat hatte.

Mein besonderer Dank gilt Dipl.-Ing. Florian Benedikt mit dem ich im Zuge dieser Diplomarbeit intensiv zusammenarbeiten durfte und meine Fachkompetenz erweitern konnte. Ich habe die Zusammenarbeit sehr geschätzt, da er bei Problemlösungen und der Durchführung von arbeitsintensiven Tätigkeiten immer mit angepackt hat und einen kleinen Scherz auf Lager hatte, um die Stimmung bei den teilweise anstrengenden Arbeitsschritten aufzulockern. Wenn ich Unterstützung benötigte, hatte er selbst bis spät in die Nacht sowie an arbeitsfreien Tagen immer ein offenes Ohr.

Meinen Studienkollegen Dipl.-Ing. Maximilian Lehr, Dipl.-Ing. Martin Hammerschmid und Dipl.-Ing. Constantin Walcher gebührt ein besonderer Dank, da wir all die Jahre zusammengehalten und durch Rückhalt, sowie positiven Zusprüchen gemeinsam das Studium absolviert haben.

Herrn Ing. Sinnhuber möchte ich für den Einblick und die Beantwortung der Fragen rund ums Thema Kläranlagen und Klärschlamm danken.

Weiters möchte ich noch betonen, dass mir die Zusammenarbeit in der Arbeitsgruppe am Institut sehr viel Spaß gemacht hat und ich spreche meinen Dank allen Mitarbeitern, die mich bei der Verfassung dieser Arbeit unterstützt haben aus.

In besonderem Maß möchte ich mich bei meinem verstorbenen Großvater HR Ing. Ernst Berger bedanken, da er meine Neugier an der Technik geweckt hat und mich bis zu seinem Ableben auf meinem Bildungsweg unterstützt hat. Bei meiner Familie und meinen Freunden möchte ich mich für die Geduld, die motivierenden Worte und Unterstützung bedanken, ohne die ein erfolgreicher Abschluss meines Studiums nicht möglich gewesen wäre.

Danke für eure Unterstützung!

## Kurzfassung

Phosphor (P) ist eine nicht substituierbare, vielseitig einsetzbare Ressource, die im Klärschlamm in einer konzentrierten Form vorzufinden ist. Folglich ist eine Rückgewinnung des P sinnvoll und wird in näherer Zukunft gesetzlich vorgeschrieben. Ein Teil des anfallenden Klärschlammes wird bei der Zementherstellung mitverbrannt, um fossile Energieträger einzusparen und einen Teil des mineralischen Feststoffbedarfs zu decken. Dadurch wird der P im Zement gebunden. Der P wird bei der thermischen Verwertung in der Klärschlamm-Asche konzentriert. Diesbezüglich wird in der vorliegenden Forschungsarbeit die Untersuchung der Klärschlammveraschung für die zukünftige Phosphorrückgewinnung in den Prozessstrukturen eines Zementwerks durchgeführt. Für die Phosphorrückgewinnung kommen der RecoPhos Prozess und das AshDec Verfahren in Frage. Letzteres erzeugt im Drehrohrofen, durch die Schwermetallentfrachtung mittels Additive, eine phosphorreiche Aschefraktion, die als Düngemittel eingesetzt werden kann. Resultierend wird das Prinzip des AshDec Verfahrens zum Recycling des P in einer stationären Wirbelschichtanlage im Labormaßstab untersucht. Hierzu wurde eine Versuchsreihe mit 16 Versuchen durchgeführt, wobei Prozessparameter, Zusatzstoffe bzw. Additive (mit/ohne), Bettmaterial (Kalkstein/Quarzsand), Temperatur (750°C/950°C) und Betriebsart (Vergasung/Verbrennung) variiert wurden. Das Additive Calciumchlorid ( $\text{CaCl}_2$ ) wurde mit dem Edukt Klärschlammgranulat zu Klärschlamm pellets verarbeitet. Für die notwendigen Analysen wurden einige Methoden angewandt, wobei sich die optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) als zweckmäßig erwiesen hat. Der P verbleibt bei allen Versuchen in der Asche. Die Vergasung von Klärschlamm pellets unter Verwendung des Bettmaterials Kalkstein im Hochtemperaturbereich (Versuch 16) erwies sich als effizientestes Verfahren. Ein Vergleich des Versuchs 16 in der stationären Wirbelschichtanlage mit den Versuchen des AshDec Verfahrens der Literatur zeigt, dass bei den Elementen Blei (Pb), Zinn (Sn), Cadmium (Cd) und Quecksilber (Hg) eine ähnliche Entfrachtung stattgefunden hat. Beim Versuch 16 kam es bei Zink (Zn) zu einer etwas geringeren, bei Kupfer (Cu) und Molybdän (Mo) zu einer erheblich niedrigeren Entfrachtung. Das Element Cu konnte nur bei einem vergleichbaren Verbrennungsversuch (Versuch 10) effizienter entfrachtet werden. Die Elemente Chrom (Cr) und Nickel (Ni) konnten weder im Zuge dieser Versuchsreihe in der stationären Wirbelschicht noch mit dem AshDec Verfahren im Drehrohrofen nennenswert entfrachtet werden. Bei einigen Proben kam es zur Unterschreitung der Nachweisbarkeitsgrenze von Elementen (Arsen, Thallium), wodurch teilweise keine Aussage über Entfrachtung möglich war. Die Betrachtung aller Versuche hinsichtlich der Schwermetallentfrachtung hat ergeben, dass bei steigender Temperatur, Zugabe von chlorhaltigen Additiven, der Betriebsart Luftvergasung unter Verwendung des Bettmaterials Kalkstein eine Erhöhung der Entfrachtung bewirkt wird. Den meisten Einfluss auf die Schwermetallentfrachtung haben dabei die Additive. Bei der Integration der Phosphorrückgewinnung in die bestehenden Strukturen eines Zementwerks werden zwei Fließbilder der notwendigen Prozessschritte vorgestellt.

## Abstract

Phosphorus (P) is a non-replaceable, versatile, and multipurpose resource and is concentrated in sewage sludge. Therefore, the recovery of phosphorus is important and corresponding laws which stipulate the recovery are already provided for. A part of the produced sewage sludge is used in the cement industry to economize fossil fuels and to cover the mineral demand of solids. Consequently, phosphorus is bound in cement. Thermal conversion concentrates phosphorus in sewage sludge ash. This master thesis researches the thermal conversion of sewage sludge for phosphorus recovery in the process structures of a cement plant. Both, the RecoPhos process and the AshDec process are in line for the phosphorus recovery. Heavy metals are removed by additives and thus, the AshDec process produces fertilizers in a rotary kiln. As a result, the suitability of the AshDec process in a fluidized bed experimental plant has been tested. A test series of sixteen experiments with a variation of additives (without/ with additives), bed material (limestone/ quartz), temperature (750°C/ 950°C) and operating modes (gasification/ combustion) has been conducted. The additive calciumchlorid ( $\text{CaCl}_2$ ) and sewage sludge have been pelletized. Various analysis methods have been applied. Whereas the most appropriate method is the inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). During all experiments phosphorus remains in the ashes. The most efficient process is the gasification of pelletized sewage sludge with additive and limestone as bed material at high temperature levels (conditions of experiment no. 16). A comparison of experiment no. 16 and the AshDec process in literature shows that the removal of lead (Pb), tin (Sn), cadmium (Cd), and mercury (Hg) is approximately equivalent. A lower amount of zinc (Zn), copper (Cu) and molybdenum (Mo) has been removed in experiment no. 16. The combustion in comparable conditions (experiment no. 10) has been a more efficient removal of Cu. The removal of chromium (Cr) and nickel (Ni) has neither been determined by the experiments in fluidized bed nor the AshDec process in literature. The concentrations of some elements have been below the limit of detectability. Therefore, no results about the removal of these elements (As, Tl) can be made. The removal of heavy metals increases under higher temperatures, with usage of additives, when gasified with air and limestone as bed material. The highest effect is reached by using additives. The integration of phosphorus recovery in the process structures of a cement plant is shown by two process flow diagrams of basic processes and mechanisms.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>STAND DER TECHNIK DER THERMISCHEN KLÄRSCHLAMMVERASCHUNG HINSICHTLICH DER PHOSPHORRÜCKGEWINNUNG</b>	<b>4</b>
2.1	PHOSPHOR IM KOMMUNALEN ABWASSER	4
2.2	BESCHREIBUNG VON KLÄRSCHLAMM	7
2.3	GESETZLICHE BESTIMMUNGEN	11
2.4	THERMISCHE BEHANDLUNG VON KLÄRSCHLAMM	14
2.5	MONOVERBRENNUNG VON KLÄRSCHLAMM IN DER WIRBELSCHICHT	16
2.6	VERGASUNG VON KLÄRSCHLAMM	22
2.7	PHOSPHORRÜCKGEWINNUNGSVERFAHREN	29
<b>3</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG DES LITERATURTEILS</b>	<b>40</b>
<b>4</b>	<b>PRINZIPIEN UND METHODEN FÜR DEN EXPERIMENTELLEN VERSUCHSAUFBAU DER KLÄRSCHLAMMVERASCHUNG</b>	<b>42</b>
4.1	BESCHREIBUNG DER EINGESETZTEN BRENNSTOFFE	42
4.2	SICHERHEITSRELEVANTE ASPEKTE	46
4.3	VERSUCHSAUFBAU	49
4.4	AUFBEREITUNG DER BRENNSTOFFPROBE	56
<b>5</b>	<b>EINGESetzte ANALYTIK HINSICHTLICH DER PHOSPHORRÜCKGEWINNUNG UND SCHWERMETALLENTFRACHTUNG</b>	<b>58</b>
5.1	RFA-RÖNTGENFLUORESCENZANALYSE	58
5.2	XRD- RÖNTGENPULVERDIFFRAKTOMETRIE	59
5.3	ICP-OES - OPTISCHE EMISSIONSSPEKTROMETRIE MIT INDUKTIV GEKOPPELTEM PLASMA	60
5.4	ENERGIEDISPERSIVE RÖNTGENSPEKTROSKOPIE (EDX) IM RASTERELEKTRONENMIKROSKOP (REM)	61
5.5	AUSWAHL EINER ANALYSENMETHODE ZUR INTERPRETATION DER ERGEBNISSE	62
<b>6</b>	<b>VERSUCHSERGEBNISSE UND RELEVANTE VERSUCHSERKENNTNISSE</b>	<b>63</b>
6.1	TATSÄCHLICHE VERSUCHSTEMPERATUREN	63
6.2	GASZUSAMMENSETZUNG UND VERGLEICH MIT LITERATURERGEBNISSEN	65
6.3	STRÖMUNGSZUSTÄNDE INNERHALB DER VERSUCHSANLAGE	68
6.4	BILDER DER PRODUZIERTEN ASCHEN	69
6.5	ANALYSENERGEBNISSE DER VERSUCHE	72
<b>7</b>	<b>DISKUSSION</b>	<b>76</b>
7.1	PHOSPHOR	76
7.2	SCHWERMETALLE	80
7.3	MÖGLICHE INTEGRATION DER PHOSPHORRÜCKGEWINNUNG IN DIE BESTEHENDEN STRUKTUREN EINES ZEMENTWERKS SOWIE DESSEN RENTABILITÄT	86
<b>8</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>90</b>
<b>9</b>	<b>AUSBLICK</b>	<b>92</b>

# 1 Einleitung

In diesem Kapitel werden die Aufgabenstellung sowie Forschungsfragen erläutert und erste inhaltliche Einblicke in die Thematiken des Phosphors vermittelt.

## Aufgabenstellung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll die Untersuchung der Klärschlammveraschung für die zukünftige Phosphorrückgewinnung in den bestehenden Prozessstrukturen eines Zementwerks durchgeführt werden.

Es soll der derzeitige Stand der thermischen Umwandlung von Klärschlamm zu Asche, sowie die darauffolgende Phosphorrückgewinnung erhoben werden. Aufbauend auf den Recherchen des aktuellen Stands des Wissens sollen Veraschungsversuche sowie Analysen der Asche durchgeführt werden. Bei den Veraschungsversuchen soll eine Versuchsreihe mit dem Brennstoff Klärschlammgranulat ohne/ mit Additiven zur Schwermetallentfrachtung, unter Einsatz der Bettmaterialien Kalkstein und Quarzsand bei differierenden Prozessbedingungen, an einer stationären Wirbelschichtapparatur im Labormaßstab durchgeführt werden. Hierzu sind alle apparativen Maßnahmen zu treffen, um die Versuchsanlage für die gestellte Aufgabe vorzubereiten. Die benötigten Analyseergebnisse werden durch diverse Analyseverfahren hergestellt, wobei zu beurteilen ist welches davon für den aktuellen Fall am zweckmäßigsten ist. Bei den Analyseergebnissen wird das Hauptaugenmerk auf das Element Phosphor, weitere Ascheinhaltsstoffe wie Aluminium (Al), Chlor (Cl), Eisen (Fe), Kalium (K), Silizium (Si), etc. und Schwermetalle aus den aktuell gültigen Gesetzen gelegt. Die Abhandlung der angeführten Aufgaben dient zur Beantwortung folgender Forschungsfragen:

## Forschungsfragen

1. Welche Art der thermischen Umwandlung von Klärschlamm schafft die bestmöglichen Voraussetzungen für die Phosphorrückgewinnung aus der erzeugten Klärschlammasche?
2. Inwiefern können mit einem Wirbelschichtverfahren Schwermetalle aus der Asche abgeschieden werden bzw. welche Auswirkungen hat das Additiv Calciumchlorid ( $\text{CaCl}_2$ ) auf die Schwermetallentfrachtung?
3. Wie kann die Integration der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm in die bestehenden Strukturen eines Zementwerks bestmöglich realisiert werden und ist dessen Rentabilität gewährleistet?

## Phosphor, ein nicht substituierbarer Rohstoff

Das Element Phosphor (P) wurde im Jahr 2014 von der Europäischen Union auf die Liste der versorgungskritischen Rohstoffe gesetzt, da es eine endliche, nicht substituierbare Ressource darstellt. P ist neben Sauerstoff (O), Wasserstoff (H), Kalium (K), Stickstoff (N) und Kohlenstoff (C) eines der Bausteine für Leben. Der Phosphor wird vorwiegend in mineralischen Lagerstätten im Obertagebau abgebaut und gelangt durch die Umwandlung in wasserlösliche Düngemittel über die Landwirtschaft in den Lebenskreislauf von Menschen und Tieren. 95% des global genutzten Phosphor wird in weiterer Folge für die Lebensmittelproduktion eingesetzt, die restlichen 5% finden Verwendung in technischen und medizinischen Bereichen.<sup>1</sup> Europa verfügt selbst über keine nennenswerten Rohphosphorlagerstätten, ist folglich auf Importe angewiesen und abhängig von aktuellen Rohstoffmärkten sowie geopolitischen Entwicklungen. Es wird vorwiegend mineralischer Phosphor in Form von Apartit und geringfügig weißer Phosphor (P<sub>4</sub>) importiert. Der größte Produzent ist mit ca. 50% der globalen Phosphorproduktion China, gefolgt von Marokko und den USA mit jeweils ca. 13%.

Aufgrund der Tatsachen, der praktisch fehlenden Kreislaufnutzung, sowie dem Streben nach einer geringeren Importabhängigkeit sehen sich staatliche und private Institutionen veranlasst Phosphor zurückzugewinnen. Für ein nachhaltiges Phosphormanagement und die Rückgewinnung des Phosphors konnten kommunale Abwässer und Tiermehle als signifikante Phosphorpotenziale identifiziert werden. In den letzten Jahrzehnten wurden eine Vielzahl an Verfahren zur Phosphorrückgewinnung weiter-, entwickelt. Neben der Möglichkeit den gelösten Phosphor direkt aus dem Abwasser zu gewinnen, zeigte sich, dass eine Rückgewinnung aus dem Klärschlamm effizienter ist. Aufgrund der anorganischen sowie bis zu einem gewissen Ausmaß thermisch stabilen Eigenschaften des Phosphors, kristallisierten sich die Phosphorrückgewinnungsverfahren aus der Klärschlammasche heraus.

Klärschlamm wird zurzeit getrocknet und in speziellen Anlagen (Monoverbrennung), Abfallverwertungsanlagen, Kraftwerken oder Zementwerken verbrannt. Für Zementwerke ist der trockene Klärschlamm als Brennstoff hochwillkommen, um die Vorgaben zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen einzuhalten. Die Verbrennungspflicht für Klärschlamm verhindert, dass Schadstoffe in die Umwelt gelangen und sich Krankheitskeime weiterverbreiten. Allerdings gehen bei der Entsorgung über beispielsweise Zementwerke auch die enthaltenen Nährstoffe verloren, denn der Phosphor wird bei der Herstellung von Zement im Material eingebunden. Neben den wichtigsten Nährstoffen sind in der Klärschlammasche Schwermetalle, die zuvor im Klärschlamm vorzufinden waren, enthalten. In vielen Fällen werden dabei die Grenzwerte nach den Düngemittelverordnungen verschiedener europäischer Länder überschritten. Resultierend müssen die Schwermetalle für eine weitere Nutzung der Klärschlammasche abgetrennt werden.

---

<sup>1</sup> vgl. European Commission 2017

In der EU fallen jährlich ca. 9,2 Mio. t TS Klärschlamm an.<sup>1</sup> Im Jahr 2017 musste in Deutschland 1.713.185 t TS Klärschlamm<sup>2</sup> aus der öffentlichen Abwasserbehandlung (kommunalem Abwasser) entsorgt werden. Dabei wurden ca. 18% in der Landwirtschaft, ca. 10% bei landschaftsbaulichen Maßnahmen, ca. 28% bei der Monoverbrennung und ca. 38% bei der Mitverbrennung eingesetzt. Die restlichen 6% wurden für weitere stoffliche Verwertung und thermische Entsorgung verwendet. In Österreich fielen im Jahr 2017 ca. 236.200 t TS Klärschlamm<sup>3</sup> an, wovon ca. 20% der Landwirtschaft, ca. 55% einer Verbrennung und ca. 25% einer sonstigen Verwertung oder Entsorgung zugeführt wurden.

---

<sup>1</sup> vgl. BANNICK u. a. 2018, S. 61

<sup>2</sup> vgl. STATISTISCHES BUNDESAMT 2018

<sup>3</sup> vgl. NEUBAUER 2019, S. 41

## 2 Stand der Technik der thermischen Klärschlammveraschung hinsichtlich der Phosphorrückgewinnung

Zur Beantwortung der gestellten Forschungsfragen wird in diesem Kapitel die relevante Literatur der thermischen Klärschlammveraschung für eine drauffolgenden Phosphorrückgewinnung behandelt. Es wird ein Einblick in die Thematik des Klärschlammes gegeben, die gesetzlichen Bestimmungen dargestellt, die derzeit thermischen Umwandlungsarten erläutert und Phosphorrückgewinnungsverfahren beschrieben. Weiters werden Ergebnisse aus diversen Forschungsprojekten vorgestellt, die als Anhaltspunkte für die durchgeführte Versuchsreihe dienen.

### 2.1 Phosphor im kommunalen Abwasser

Dabei wird vorwiegend auf die Abtrennung des Phosphors aus dem kommunalen Rohabwasser eingegangen. Eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise und Mechanismen in einer Kläranlage ist in der fachspezifischen Literatur vorzufinden.<sup>1</sup> In kommunalem Rohabwasser liegt Phosphor in gelöster und organisch/anorganisch gebundener Form vor. Phosphor tritt in gelöster Form als Orthophosphat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), in organisch gebundener Form in der Zellstruktur von Mikroorganismen und anorganisch gebunden als Polyphosphate (Metallphosphate) auf.<sup>2</sup> Der im Abwasser gelöste Phosphor wird in der Kläranlage mittels biologischer und chemisch-physikalischer Mechanismen stabilisiert und in eine feste Form übergeführt. Anschließend wird der Phosphor über den Klärschlamm (Primär- und Überschussschlamm) ausgetragen und einer Schlammbehandlung zugeführt.<sup>3</sup> In Abbildung 1 wird der potenzielle Stofffluss zur Phosphorrückgewinnung aus den anfallenden Massenströmen einer Kläranlage einschließlich der Schlammbehandlung und thermischen Behandlung dargestellt.

---

<sup>1</sup> ABWASSERTECHNISCHE VEREINIGUNG 1985

<sup>2</sup> vgl. ABWASSERTECHNISCHE VEREINIGUNG 1997

<sup>3</sup> vgl. IAT-INGENIEURBERATUNG GMBH 2014, S. 2 ff

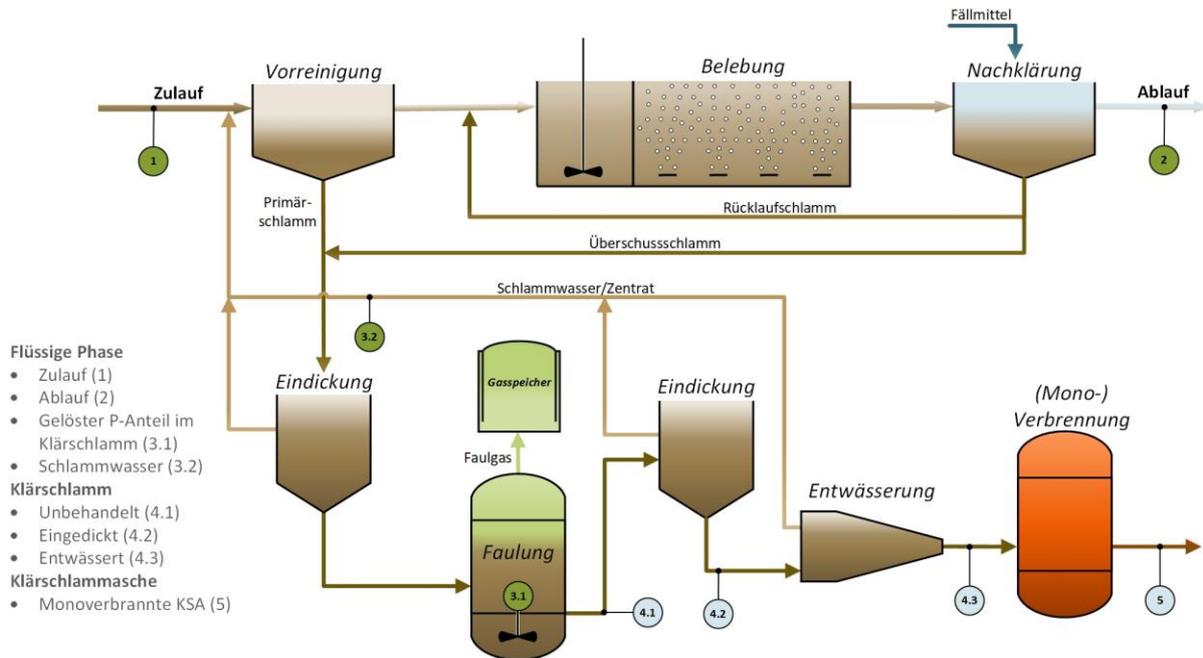


Abbildung 1: Kläranlage mit anschließender Schlammbehandlung und thermischer Behandlung des Klärschlammes durch (Mono-)Verbrennung<sup>1,2</sup>

**Mechanische Reinigung:** Für die Abscheidung der Grobgrutfraktion führt der Zulauf des Rohabwassers über eine Rechenanlage. Anschließend passiert es einen Sand-, Fettfang und gelangt dann zur Vorreinigung in ein Vorklärbecken. Dort sedimentiert vorwiegend organischer Phosphor und wird so aus dem Abwasserstrom entfernt. Die sedimentierten Feststoffe werden als Primärschlamm (PS) abgezogen. Im Vorklärbecken können, bezogen auf den Kläranlagenzulauf, ca. 10% des Phosphors abgetrennt werden.<sup>3</sup>

**Biologische/chemisch-physikalische Reinigung:** In der darauffolgenden Belebung wird ca. 35% der Phosphorzulaufkraft einer Kläranlage durch den physiologischen Phosphorbedarf der Mikroorganismen in Biomasse gebunden (*biologische Phosphorelimination*).<sup>4</sup> Dieser Anteil kann durch spezielle Prozessführung der Belebung auf bis zu 90% gesteigert werden (*vermehrte biologische Phosphorelimination = Bio-P*).<sup>5</sup> Um die geforderten Ablaufgrenzwerte einzuhalten wird eine Phosphatfällung durchgeführt. Diese chemisch-physikalische P-Elimination erfolgt durch Zugabe von Fällmittel wie Eisen- bzw. Aluminiumsalz oder Kalk. Diese schwerlöslichen Phosphate setzen sich als Fällschlamm (FS) gemeinsam mit dem belebten Schlamm in der Nachklärung ab und werden als Überschussschlamm (ÜS) entnommen.<sup>1</sup> Ein kleiner Teilstrom des ÜS wird als Rücklaufschlamm (RS) der Belebung zugeführt. Der PS und ÜS wird vereinigt und als Klärschlamm der Schlammbehandlung zugeführt.

Die Wahl des Fällmittels muss auf das geplante P-Rückgewinnungsverfahren abgestimmt sein, da vorwiegend die Fällmittel Eisen und Aluminium bei vielen P-Rückgewinnungsverfahren problematisch sind. Eine

<sup>1</sup> vgl. MONTAG & PINNEKAMP 2008, S. 22

<sup>2</sup> vgl. EGLE, AMANN, RECHBERGER & ZESSNER 2016, S. 124

<sup>3</sup> vgl. EGLE, RECHBERGER & ZESSNER 2014a, S. 36ff

<sup>4</sup> vgl. IAT-INGENIEURBERATUNG GMBH 2014, S. 2

<sup>5</sup> vgl. RÖSKE & UHLMANN 2005

detaillierte Beschreibung der Phosphorelimination sowie der Prozessführung ist in der fachspezifischen Literatur vorzufinden.<sup>1</sup>

Schlammbehandlung: Ziel der Schlammbehandlung ist die Erhöhung des Feststoffgehaltes und dessen weitere Stabilisierung. Das Ergebnis resultiert in einer deutlichen Massen- und Volumenreduktion. Dies wird durch mehrere Prozessstufen erreicht und vorwiegend in Eindickung, Faulung und Entwässerung gegliedert. Während Eindickung und Entwässerung zur Reduktion des Wassergehaltes durchgeführt werden, um Transportkosten des Klärschlammes zu einer externen Verbrennungsanlage einzusparen, dient die Faulung zur anaeroben Schlammstabilisierung.<sup>1</sup> Das bei der Faulung entstehende Gas wird anschließend in einem Gasspeicher zwischengelagert. Beispielsweise setzt sich das Gas bei der Kläranlage Stockerau, die für 30 000 EW ausgelegt wurde und eine Auslastung von ca. 65% aufweist, vorwiegend aus Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>, zwischen 18 – 28 vol.-%) und Methan (CH<sub>4</sub>) zusammen. Der Schwefel (S) wird aufgrund der vorherigen Fällung mit Eisen im Schlamm gebunden und nur in einem äußerst geringen Ausmaß in Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) umgewandelt (ca. 0,01 vol.-%). Der Gasanfall bei dieser Anlage beträgt im Normalfall ca. 14 – 15 Nm<sup>3</sup>/h und wird dem Gasspeicher mit 500 m<sup>3</sup> zugeführt. Das Gas wird zur Beheizung der Betriebsräume und bei Bedarf zur Beheizung der Faulung verwendet, um die Arbeitsbedingungen der Mikroorganismen anzupassen.

Schlammstabilisierung: Die Schlammstabilisierung dient zu Mineralisierung der organischen Substanz im Klärschlamm und wird in den verschiedenen Bereichen der Kläranlage durchgeführt. Die Stabilisierung kann aerob oder anaerob (Faulung), chemisch-physikalisch durch Zugabe von Fällmittel oder thermisch durch Verbrennung erfolgen. Ziel ist es, dass im Anschluss biologische oder chemische Umwandlungsprozesse nur noch begrenzt oder sehr langsam ablaufen.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> vgl. MONTAG & PINNEKAMP 2008, S. 24ff

<sup>2</sup> vgl. <http://www.wasser-wissen.de/> (gelesen am. 04.02.2019)

## 2.2 Beschreibung von Klärschlamm

Kommunale Klärschlämme bestehen aus festen Abwasserinhaltsstoffen (PS) und dem bei der biologischen und chemischen Abwasserreinigung entstandenen Bakterien- und Fällschlamm (ÜS).<sup>1</sup>

Im Bereich der Biomasse zählt Klärschlamm zu den Sekundärenergieträgern, da dessen Energie nur indirekt von der Sonne gewonnen wird. Charakteristisch für Klärschlamm ist der hohe Wassergehalt, der einen maßgebenden Einfluss auf die Förderbarkeit hat.<sup>2</sup> Folglich muss für die weitere Behandlung eine Entwässerung durchgeführt werden.<sup>3</sup> Hier wird zunächst eine mechanische Entwässerung mittels Zentrifuge, Kammerfilterpresse oder Siebbandpresse durchgeführt. Der Wassergehalt wird von ca. 97% auf max. 55% reduziert. Dieser Verfahrensschritt findet im Allgemeinen bereits an der Kläranlage statt (siehe Abbildung 1). Die zusätzliche Entwässerung erfolgt durch thermische Trocknung. Dafür können die Prozessstrukturen von Kraftwerken genutzt werden.<sup>4</sup> In Bezug auf die Prozessstrukturen eines Zementwerks kann die Abwärme der Öfen für die thermische Trocknung verwendet werden. Die Einteilung der Trocknung erfolgt nach Art der Wärmeübertragung in Konvektions- und Kontakt Trocknung. Die daraus modifizierten Trocknungsverfahren sind in der fachspezifischen Literatur vorzufinden.<sup>5,6</sup>

### Charakteristik von Klärschlamm

Die Zusammensetzung des Klärschlammes ist maßgebend von der Herkunft abhängig (kommunale, industrielle Kläranlage, Kläranlage im städtischen oder ländlichen Bereich etc.) und unterliegt einem großen Schwankungsbereich. Klärschlamm ist reich an organischen Substanzen und enthält essenzielle Pflanzennährstoffe die in Tabelle 1 ersichtlich sind. Hinsichtlich der Nährstoffe werden vorwiegend Phosphor und im geringen Maße Stickstoff als relevante Wertstoffe im Klärschlamm angesehen.

Tabelle 1: Ausgewählte Bestandteile von kommunalem Klärschlamm<sup>7,8</sup>

Element	C	O	H	N	S	Cl	P
Einheit	mass.-% <sub>tr</sub>						
Wert	33-50	10-20	3-4	2-6	0,5-1,5	0,05-0,5	0,2-5

Aus den Bestandteilen von Klärschlamm ergeben sich folgende brennstofftechnisch relevante Charakteristiken, die in Tabelle 2 vorzufinden sind. Neben den genannten Nährstoffen sind im Klärschlamm auch Verunreinigungen enthalten. Die direkte Ausbringung von Klärschlamm als Düngemittel ist aufgrund dieser Verunreinigungen problematisch.

<sup>1</sup> vgl. BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT 2011, S. 55

<sup>2</sup> vgl. TONDL 2013, S. 29

<sup>3</sup> vgl. PENTHOR u. a. O. J., S. 1

<sup>4</sup> vgl. KALTSCHMITT, HARTMANN & HOFBAUER 2016, S. 1086

<sup>5</sup> GÖRNER & HÜBNER 2002

<sup>6</sup> WIECHMANN u. a. 2012, S. 21

<sup>7</sup> vgl. OLIVA u. a. 2009, S. 17f

<sup>8</sup> vgl. WIECHMANN u. a. 2012, S. 10

Tabelle 2: Ausgewählte brennstofftechnische Eigenschaften von kommunalem Klärschlamm<sup>1,2</sup>

Parameter	Einheit	Wert
Heizwert	MJ/kg <sub>tr</sub>	10 – 12
Wassergehalt	mass.-%	Je nach Trocknungsgrad (siehe Abbildung 2)
Aschegehalt (DIN 51719)	mass.-% <sub>tr</sub>	30-50
Anteil flüchtige Bestandteile, aschefrei	mass.-% <sub>tr,af</sub>	80-90% <sup>3,4</sup>

Um den Klärschlamm direkt auszubringen sind Grenzwerte für die Schwermetalle Arsen (As), Blei (Pb), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), ChromVI (Cr(VI)), Kupfer (Cu), Quecksilber (Hg), Nickel (Ni), Vanadium (V) und Zink (Zn) einzuhalten. Die genauen Voraussetzungen und Grenzwerte sind im Kapitel 2.3 vorzufinden. In Tabelle 3 werden zusätzlich die typischen Konzentrationen von Mangan (Mn), Selen (Se), Thallium (Tl), Zinn (Sn), Molybdän (Mo), Calcium (Ca), Kalium (K), Magnesium (Mg) im Klärschlamm aus kommunalen Kläranlagen dargestellt.

Tabelle 3: Ausgewählte Inhaltsstoffe von Klärschlamm aus kommunalen Kläranlagen<sup>1,2</sup>

Element	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Se	Tl
Einheit	mg/kg TS								
Wert	4-30	70-100	1,5-4,5	50-80	300-350	600-1500	30-35	1-5	0,2-0,5
Element	Hg	Zn	Sn	Mo	Co	Ca	K	Mg	V
Einheit	mg/kg TS								
Wert	0,3-2,5	100-300	30-80	~4 000	~7 000	~70 000	~3 000	~10 000	10-100

Die Verunreinigungen in Klärschlamm können laut Tabelle 4 in folgende Gruppen eingeteilt werden:

Tabelle 4: Arten der Verunreinigungen im Klärschlamm<sup>5</sup>

Verunreinigungen	
anorganisch	Metalle, Schwermetalle
organisch	organische Mikroverunreinigungen, pathogene Keime

Die organischen Verunreinigungen werden spätestens bei einer thermischen Verwertung zerstört und können somit einfacher abgetrennt werden. Die Entfernung anorganischer Verunreinigungen stellt einen höheren Prozessaufwand dar und ist daher problematischer. Anorganische Verunreinigungen werden neben Schwermetallkontaminierung durch betriebliche Einleitungen, Oberflächenabschwemmung der Infrastruktur und Haushalte sowie durch Fällmittel eingebracht. Fällmittel sind teilweise Neben- oder Abfallprodukte großtechnischer Prozesse und können Schwermetalle enthalten. Diese Verunreinigungen werden weitestgehend in den Fällschlamm gebunden und erhöhen somit die Schadstofffracht im Klärschlamm.<sup>6</sup> Die Zusammensetzung und der Gehalt der Verunreinigungen des Klärschlammes unterliegen, abhängig von Herkunft, ebenfalls einem großen Schwankungsbereich.

<sup>1</sup> vgl. OLIVA u. a. 2009, S. 17f

<sup>2</sup> vgl. WIECHMANN u. a. 2012, S. 10

<sup>3</sup> vgl. WERTHER & SAENGER 2000, S. 2

<sup>4</sup> vgl. PENTHOR 2009, S. 16

<sup>5</sup> vgl. EGLE u. a. 2014a, S. 44

<sup>6</sup> vgl. MONTAG & PINNEKAMP 2008, S. 30

## Brennstoffförderung von Klärschlamm

Für die Einbringung des Klärschlammes in einen Reaktor ist der Wassergehalt (WG) von entscheidender Bedeutung. Der Wassergehalt beeinflusst die für die Förderung von Klärschlamm relevanten mechanischen Eigenschaften. Die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften vom Wassergehalt sowie die für die Entwässerung eingesetzten Verfahren sind in Abbildung 2 ersichtlich. Hierbei wird anhand von Klärschlamm (1000 kg mit 95% WG) dargestellt, bei welchem Verfahren der jeweilige Wassergehalt des Klärschlammes erreicht werden kann.

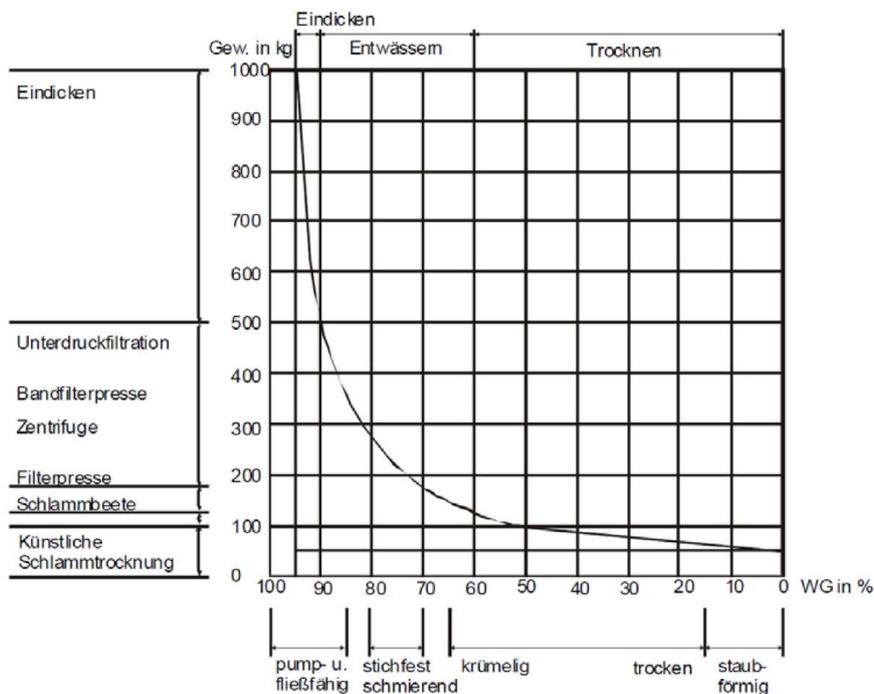


Abbildung 2: Eigenschaften von Klärschlamm in Abhängigkeit vom Wassergehalt sowie die Entwässerungsverfahren<sup>1</sup>, 95% WG bei 1000 kg, 0% WG bei 50 kg

Die Art der Einbringung in den Reaktor ändert sich je nach Wassergehalt des Klärschlammes. Ab einem Wassergehalt von ca. 80% ist der Klärschlamm pump- und fließfähig. Der Klärschlamm ist bis zu einem Wassergehalt von ca. 65% krümelig und kann mittels Förderschnecke gefördert werden. Zwischen 70% - 80% ist eine zähe, stichfeste Region, wobei der Klärschlamm schwer zu fördern ist.<sup>2</sup> Für großtechnische Anwendung werden für diesen Bereich Spezialpumpen oder Exzentrerschnecken eingesetzt.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> TONDL 2013, S. 29

<sup>2</sup> vgl. TONDL 2013, S. 29

<sup>3</sup> THOMÉ-KOZMIENSKY 1998

## Bindungsform von Phosphor in der Klärschlammasche<sup>1</sup>

In der Zusammensetzung von Klärschlammasche findet man den Phosphorgehalt zumeist als Diphosphorpentoxid ( $P_2O_5$ ), der keinesfalls auf die tatsächlich vorliegende Verbindung schließen lässt. Der nachgewiesene Phosphor wird in Analysen (so wie Metalle) als Oxid angenommen. Tatsächlich aber liegt der Phosphor in Klärschlammaschen als Phosphat von Metallen vor. Eisen, Aluminium und auch Calcium sind hier die wichtigsten Bindungspartner. Je nach Herkunft unterscheiden sich Zusammensetzungen, Phosphorgehalte sowie Bindungsformen der Klärschlammaschen.

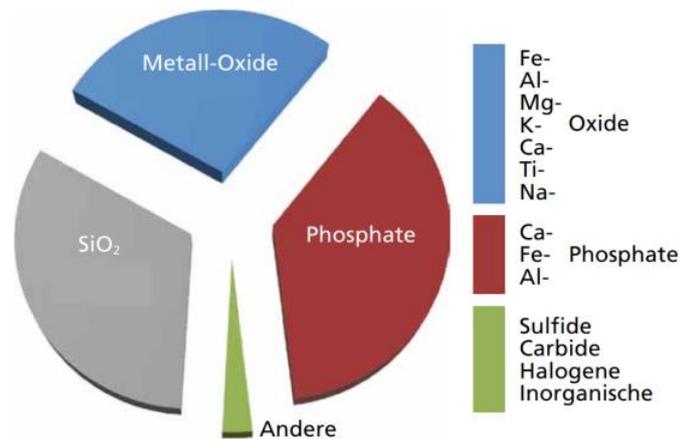


Abbildung 3: Zusammensetzung einer Klärschlammasche<sup>2</sup>

Für die in Abbildung 3 dargestellte Zusammensetzung wurde beispielhaft eine Asche einer Klärschlammverbrennungsanlage in Stuttgart herangezogen. Sie zeichnet sich durch einen hohen Phosphorgehalt von 7,7 mass.-% aus, der in Form von Phosphaten vorliegt.

Die meisten Schwermetalle werden im selben Ausmaß wie Phosphor in der Asche angereichert.<sup>3</sup> Aufgrund des niedrigen Siedepunktes verdampft Quecksilber größtenteils. In der Klärschlammasche wird als dominierende phosphorhaltige Mineralphase Whitlockit ( $Ca_9(Mg,Fe^{2+})(PO_3(OH)PO_4)_6$ ) und vereinzelt Stanfieldit ( $Ca_4(Mg,Fe^{2+},Mn)_5(PO_4)_6$ ) und Apatite ( $Ca_5(F,Cl,OH)PO_4)_3$ ) nachgewiesen. Dadurch ist der Phosphor stark chemisch gebunden. Weiters sind diese Verbindungen nicht wasserlöslich.<sup>4</sup> Analyseergebnisse von der realen Aschezusammensetzung, die im Zuge von Forschungsarbeiten hergestellt wurden, sind in Kapitel 2.7.2 vorzufinden. Aus diesen Versuchen ist festzuhalten, dass je nach Versuchstemperaturen unterschiedliche Aschephase auskristallisieren.

Detailliertere Informationen zu den Bindungsformen von Phosphor ist der fachspezifischen Literatur zu entnehmen.<sup>5,6,7</sup>

<sup>1</sup> vgl. SCHÖNBERG & RAUPENSTRAUCH 2015, S. 482

<sup>2</sup> SCHÖNBERG & RAUPENSTRAUCH 2015, S. 482

<sup>3</sup> vgl. LEDERER & RECHBERGER 2010

<sup>4</sup> vgl. EGLE u. a. 2014a, S. 49f

<sup>5</sup> SKOGLUND 2014

<sup>6</sup> SKOGLUND u. a. 2014

<sup>7</sup> LINNA u. a. 2013, S. 5925

## 2.3 Gesetzliche Bestimmungen

In Anlehnung an die Ziele und Grundsätze des Abfallwirtschaftsgesetzes (AWG, 2002) sollen Abfälle vorrangig verwertet bzw. vor einer endgültigen Ablagerung entsprechend behandelt werden. Auswirkungen auf Menschen, Tiere und Pflanzen sowie deren Lebensgrundlage sollen dabei so gering wie möglich gehalten werden. Deshalb gelten für die Verwertung und Ablagerung von Klärschlamm strenge Regelungen. Diese Regelungen rund um das Thema Klärschlamm finden sich in diversen Verordnungen und Gesetzen wieder. Hierbei werden vor allem die in Österreich und Deutschland geltenden Verordnungen und Gesetze behandelt.

Die thermische Verwertung von Klärschlamm ist vorwiegend in der Abfallverbrennungsverordnung-AVV (Ö) und der 17.Bundesimmissionsschutzverordnung-17.BImSchV (D) rechtlich geregelt. Insbesondere enthalten diese Verordnungen Grenzwerte für die Emissionen von Luftschadstoffen bei der Abfall(mit)verbrennung. Die Emissionsgrenzwerte für Abfallverbrennungsanlagen gemäß §8 Absatz 1 der 17.BImSchV sind in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich.

Tabelle 5: Emissionsgrenzwerte für Abfallverbrennung gemäß 17.BImSchV<sup>1</sup>

Verbindungen	Einheit	Tagesmittelwert (Standardbedingungen, trockene Basis, 11 vol.-% O <sub>2</sub> )
CO	mg/m <sup>3</sup>	50
NO <sub>x</sub> (in NO <sub>2</sub> )		150
SO <sub>2</sub>		50
HCl		10
HF		1
organische Stoffe (Gesamtkohlenstoff)		10
Hg		0,03
NH <sub>3</sub> *		10
Cd+Tl		0,05
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V+Sn		0,5
Dioxine und Furane**	ng/m <sup>3</sup>	0,1
*sofern zur Minderung der Emissionen von Stickstoffoxiden ein Verfahren zur selektiven katalytischen oder nichtkatalytischen Reduktion eingesetzt wird		
** gemäß Anlage 2 der 17.BImSchV		

Für die Abfallmitverbrennung gelten die Emissionsgrenzwerte gemäß §9 der 17. BImSchV. In Anlage 3 der 17.BImSchV sind die Emissionsgrenzwerte für Anlagen zur Herstellung von Zementklinker oder Zementen sowie Anlagen zum Brennen von Kalk, in denen Abfälle oder Stoffe gemäß §1 Absatz 1 der 17.BImSchV mitverbrannt werden ersichtlich.

Die Ablagerung des Klärschlammes unterliegt unter anderem den gesetzlichen Bestimmungen der Deponieverordnung (Ö,D). Die direkte Ausbringung von Klärschlamm unterliegt den Grenzwerten der bundesländerspezifischen Klärschlammverordnung (Ö,D). Eine Novellierung der Klärschlammverordnung (in

<sup>1</sup> vgl. [https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv\\_17\\_2013/](https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_17_2013/) (gelesen am: 16.08.2018)

D, AbfallKlärV) hatte als Ziel den Ausstieg aus der direkten landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung und den Einstieg in die Phosphorrückgewinnung. Durch die Umwandlung von Klärschlamm können nährstoffreiche Düngemittel produziert werden, wobei die Verwendung sowie die Grenzwerte für Schadstoffe (Schwermetalle) vorwiegend in der Düngemittelverordnung (Ö,D) und AbfallKlärV geregelt sind. Im Folgenden werden nur die Grenzwerte für die Schwermetalle herangezogen, da in Kapitel 2.7 Verfahren beschrieben werden, dessen Produkte als Düngemittel eingesetzt werden können. Die Grenzwerte für relevante Schwermetalle sind in der folgenden Tabelle ersichtlich.

Tabelle 6: Grenzwerte für Schwermetalle laut Düngemittelverordnung (Ö,D)

Schwermetalle	Einheit	Grenzwerte			
		Österreich <sup>1</sup>		Deutschland <sup>2</sup>	
		Düngemittel*, Bodenhilfsstoffe, Pflanzenhilfsmittel	Mineralische Düngemittel mit mehr als 5% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Düngemittel*, Bodenhilfsstoffe, Pflanzenhilfsmittel	Mineralische Düngemittel mit mehr als 5% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Blei	mg/kg TS	100	100	150	150
Cadmium		3	75 mg/kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,5	50 mg/kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Chrom VI		2	2	2	2
Chrom ges.		-	-	-	-
Nickel		100	100	80	80
Quecksilber		1	1	1	1
Vanadium		-	1500	-	-
Arsen		40	40	40	40
Thallium		-	-	1	1
*ausgenommen mineralische Düngemittel mit mehr als 5% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>					
-nur Kennzeichnung ab Mindestgehalt laut DMV notwendig					

Die novellierte AbfallKlärV (seit 03.10.2017 in Kraft getreten) beruht auf dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG, D) und regelt die Bewirtschaftung von Klärschlamm. In der AbfallKlärV sind erstmals Vorgaben zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlämmen vorzufinden. Diese haben die Betreiber von Kläranlagen bzw. Klärschlammverbrennungsanlagen nach Ablauf einer zweistufigen Übergangsfrist zu beachten. Die Pflicht zur Phosphorrückgewinnung tritt ab 01.01.2029 für definierte Anlagen in Kraft. Dabei muss der Phosphor aus Klärschlämmen rückgewonnen werden, wenn der Phosphorgehalt im Klärschlamm  $\geq 20$  g/kg TS beträgt.<sup>3</sup> Weiters wird in der AbfallKlärV der höchstzulässige Gehalt an Zink mit 4000 ppm<sup>4</sup> gesetzlich verankert. Gemäß §8 Absatz 1 der AbfallKlärV gilt für das Schwermetall Kupfer der zulässige Höchstgehalt laut Düngemittelverordnung (D) von 900 ppm<sup>5</sup>.

<sup>1</sup> vgl. <https://www.ris.bka.gv.at/>, Anlage 2 (gelesen am: 21.09.2019)

<sup>2</sup> vgl. <http://www.gesetze-im-internet.de/>, Anlage 2, Tabelle 1.4, Spalte 4 (gelesen am: 21.08.2019)

<sup>3</sup> vgl. BANNICK u. a. 2018, S. 9ff

<sup>4</sup> vgl. <https://www.gesetze-im-internet.de/>, Anlage 1 (gelesen am: 21.08.2019)

<sup>5</sup> vgl. <http://www.gesetze-im-internet.de/>, Anlage 1, Abschnitt 4.1, Spalte 6, Absatz 2 (gelesen am: 21.08.2019)

In der österreichischen Düngemittelverordnung werden neben den Grenzwerten laut Tabelle 6 auch die maximale Aufwandmenge (g/ha) von Schwermetallfrachten auf landwirtschaftliche Nutzflächen definiert. Diese maximale Aufwandmasse bezieht sich auf einen Zeitraum von zwei Jahren und gilt für die Elemente Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg und Zn. Laut Düngemittelverordnung (Ö) wird weiters geregelt, dass granulieren und beschichten mit gesundheitlich und ökologisch unbedenklichen, im Boden abbaubaren Stoffen zulässig ist. Zusätzlich gilt für Österreich und Deutschland, dass ein mineralischer Phosphatdünger einen länder- und typenspezifischen Mindestgehalt  $P_2O_5$  (rechnerisch laut Düngemittelverordnung aus dem Phosphorgehalt ermittelt) enthalten muss. Je nach Typ sind unterschiedliche Mindestgehalte an Begleitelementen erforderlich. Für eine Verwendung als Dünger muss dieser eine definierte Löslichkeit (sauer, basisch) aufweisen sowie aus zulässigen Elementverbindungen (z.B. diverser Sulfate, Carbonate, Phosphate, etc.) bestehen.<sup>1,2,3</sup>

---

<sup>1</sup> vgl. <https://www.ris.bka.gv.at/>, Anlage 1 (gelesen am: 21.08.2019)

<sup>2</sup> vgl. <https://www.gesetze-im-internet.de/>, Anlage 1, Abschnitt 1.2 (gelesen am: 21.08.2019)

<sup>3</sup> vgl. <https://www.gesetze-im-internet.de/>, Anlage 2, Tabelle 4 (gelesen am: 21.08.2019)

## 2.4 Thermische Behandlung von Klärschlamm

Der Klärschlamm muss für eine anschließende Rückgewinnung des Phosphors aus Asche thermisch behandelt werden. Um die verschiedenen Verfahren der thermischen Behandlung von Klärschlamm zu beschreiben, können die Technologien in drei Kategorien eingeteilt werden: die Monoverbrennung, Co- Verbrennung und alternative Verfahren.<sup>1</sup> In Abbildung 4 werden diese Kategorien dargestellt.

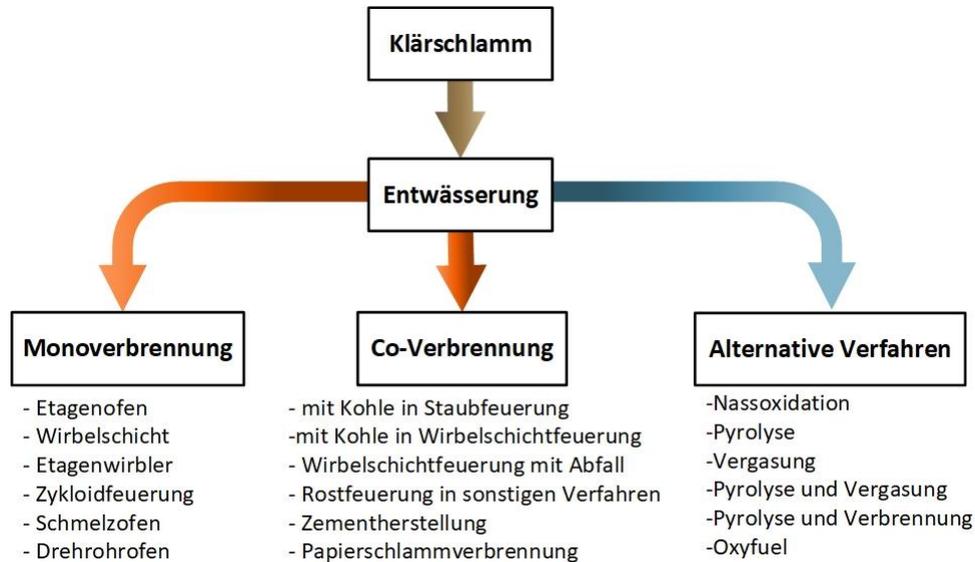


Abbildung 4: Arten der thermischen Verwertung von Klärschlamm<sup>2</sup>

In dieser Arbeit steht die Konditionierung der Klärschlamm-Asche für eine nachfolgende Phosphorrückgewinnung im Vordergrund. Deshalb wird vorwiegend auf die Wirbelschicht-Monoverbrennung bzw. Verbrennung ohne Vermischung mit P-ärmer Asche (Stützfeuerung) sowie das alternative Verfahren, Vergasung in der Wirbelschicht, eingegangen. Zusätzlich wird ein Einblick in die Co-Verbrennung in Zementwerken gegeben. Für die Verbrennung von Klärschlamm wird zum aktuellen Stand der Technik die Wirbelschichtfeuerung mit anschließender Rauchgasreinigung eingesetzt.<sup>3</sup> Eine industrielle thermische Verwertung von Klärschlamm wird derzeit bei der „Fernwärme Wien GmbH“ in Wirbelschichtöfen durchgeführt. Zur Verbrennung des Klärschlammes werden hochkalorische Stützbrennstoffe wie Schweröl, Tiermehl etc. verwendet.<sup>4,5</sup> Die Vergasung von Klärschlamm wurde unter anderem erfolgreich in Wirbelschichtreaktoren an der TU Wien und Universität von Canterbury, Christchurch, Neuseeland durchgeführt. Auf die Versuchsergebnisse der Vergasung wird in Kapitel 2.6 näher eingegangen.

<sup>1</sup> TONDL 2013, S. 29

<sup>2</sup> vgl. WERTHER & SAENGER 2000, S. 2

<sup>3</sup> vgl. EGLE u. a. 2014a, S. 84

<sup>4</sup> vgl. PENTHOR 2009, S. 1

<sup>5</sup> vgl. CHRISTA 2011, S. 25

In Deutschland sind 26 Klärschlamm Monoverbrennung/vergasungsanlagen in Betrieb, wobei 22 davon als Wirbelschichtanlagen ausgeführt sind (Abbildung 5).<sup>1</sup> Diese Anlagen sind vorwiegend als stationäre Wirbelschichten in Verwendung. Am Standort Altenstadt, Straubing und Frankfurt am Main sind Etagenöfen, -wirbler, Drehrohröfen und Rostfeuerungen im Einsatz. Seit dem Jahr 2004 gibt es am Standort der Kläranlage Balingen eine Wirbelschicht-Vergasungsanlage. Diese Anlage besitzt eine Kapazität von 1.200 t TM/a Klärschlamm. Weitere Vergasungsanlagen befinden sich in Dinkelsbühl und Mannheim.<sup>2</sup> In der nachfolgenden Abbildung werden die zum Stand 2013 in Betrieb befindliche Anlagen mit den jeweiligen Jahreskapazitäten dargestellt.

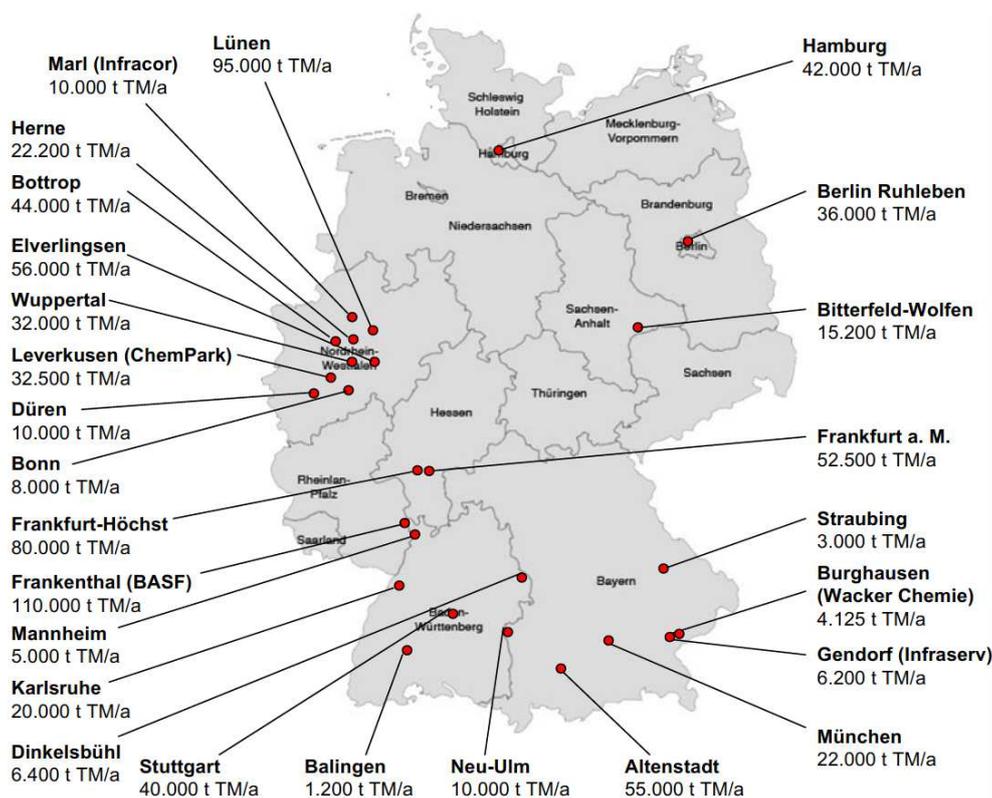


Abbildung 5: Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen in Deutschland<sup>3</sup>

Die anlagenspezifischen Prozessdaten des jeweiligen Standortes sind der fachspezifischen Literatur zu entnehmen.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> KRÜGER & ADAM 2014, S. 44

<sup>2</sup> vgl. WIECHMANN u. a. 2012 Anhang I

<sup>3</sup> ADAM & KRÜGER 2013

<sup>4</sup> WIECHMANN u. a. 2012

## 2.5 Monoverbrennung von Klärschlamm in der Wirbelschicht

Klärschlamm mit einem Wassergehalt von über 70 mass.-% kann nicht autotherm verbannt werden. Um eine Monoverbrennung des Klärschlammes durchführen zu können muss eine Vortrocknung stattfinden. In der Regel findet die Verbrennung von Klärschlamm (mechanisch entwässert mit einem WG von 50 – 68 mass.-%) in stationär betriebenen Wirbelschichtöfen unter Zugabe von hochkalorischen Stützbrennstoff statt.<sup>1</sup> Im Falle einer thermischen Verwertung ist die Erreichung eines möglichst hohen Heizwertes des Klärschlammes und damit auch ein dementsprechend hoher Trocknungsgrad des Materials wünschenswert. Der Energieaufwand verläuft jedoch nicht linear proportional zum Trocknungsgehalt, sondern aufgrund von zu überwindenden Absorptionswärmen und Kapillarkräften überproportional. Weiters funktioniert die für hohe Trockensubstanzgehalte erforderliche thermische Trocknung mit deutlich geringeren Wirkungsgraden als die mechanischen Entwässerungsverfahren.<sup>2</sup> Der Ascheanteil der Trockensubstanz ist sehr hoch und kann bis zu 50 mass.-% betragen, wobei diese Asche in Form von Bett- und Flugasche anfällt. Die Bett- und Flugasche muss mit einem entsprechenden Ascheabzug entfernt werden. Im Falle einer Klärschlammmitverbrennung fällt anstelle von Flugasche teilweise Schlacke an. Ein hoher Anteil an stickstoff-, chlor- und schwefelhaltigen Gasen, sowie Dioxin und Furan erfordert eine entsprechende Rauchgasnachbehandlung, um die örtlichen Emissionsvorschriften einzuhalten (siehe Kapitel 2.3).<sup>3,4</sup> Aufgrund des hohen Anteils an flüchtigen Bestandteilen und dem geringen Anteil an Koks, wird die Klärschlammverbrennung durch die Verbrennung der flüchtigen Bestandteile dominiert. Diese machen einen hohen Anteil am gesamten Energieinhalt aus.<sup>5</sup>

### Mechanismen der Klärschlammverbrennung

Durch die problematischen Brennstoffeigenschaften von Klärschlamm hinsichtlich eines hohen und stark variierenden Wassergehaltes, Ascheanteil und Anteil an flüchtigen Bestandteilen sind vor allem in Wirbelschichtöfen die Mechanismen Trocknung, Entgasung und Koksabbrand relevant.<sup>6</sup>

- Trocknung und Entgasung: laufen als parallele Mechanismen ab.<sup>5</sup>

Betrachtungen eines Einzelpartikels haben gezeigt, dass bereits die Entgasung am Partikelrand eintritt, obwohl die Trocknung des Partikelkerns noch nicht abgeschlossen ist.<sup>7</sup> Dieser parallele Ablauf der Mechanismen ist charakteristisch für eine Wirbelschicht und macht es zu einem effizienten Behandlungsverfahren.

---

<sup>1</sup> vgl. WERTHER & SAENGER 2000, S. 1

<sup>2</sup> PENTHOR 2009, S. 30

<sup>3</sup> vgl. EGLE u. a. 2014a, S. 84f

<sup>4</sup> vgl. LECKNER u. a. 2003, S. 479

<sup>5</sup> vgl. OGADA & WERTHER 1996, S. 617

<sup>6</sup> vgl. TONDL 2013, S. 30

<sup>7</sup> THOMÉ-KOZMIENSKY 1998

Die aus dem Partikelkern austretenden Dampfströme führen zur Kühlung des Partikels. Dadurch nimmt die Entgasungszeit von Klärschlamm mit einem hohen Wassergehalt mehr Zeit in Anspruch als jene von verhältnismäßig trockenem Klärschlamm. In Abbildung 6 werden der Verlauf des Wassergehaltes, des Gehaltes an flüchtigen Bestandteilen sowie die Partikelkerntemperatur über die Zeit dargestellt.

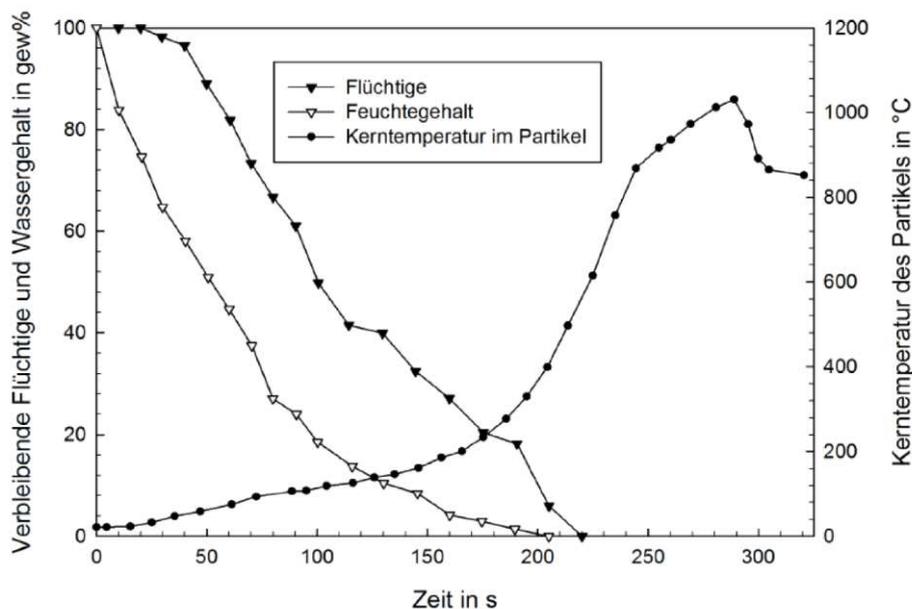


Abbildung 6: Wassergehalt, flüchtige Bestandteile (Flüchtige) und Temperaturprofil von Klärschlammartikel (4-20 mm)<sup>1</sup>

Die Entgasung von Klärschlamm beginnt schon ab einer Temperatur von ca. 150°C. Dies ergaben Messungen des Heizwertes von getrockneten Klärschlammartikeln bei steigender Temperatur. Ab einer Temperatur von ca. 200°C wurde nur noch die Hälfte des anfänglichen Heizwertes gemessen. Dies deutet auf eine Entgasung bei geringen Temperaturen hin. Bei steigender Aufheizrate, höherer Endtemperatur, langen Verweilzeiten und kleineren Durchmessern des Klärschlammartikels steigt die Masse an verflüchtigenden Stoffen an.<sup>2</sup> Die Gaszusammensetzung des flüchtigen Bestandteils besteht zum Großteil aus gasförmigen Wasserstoff (H<sub>2</sub>), Kohlenmonoxid (CO), CO<sub>2</sub> und verschiedenen Kohlenwasserstoffen (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>). Der Hauptanteil wird von CO und verschiedenen Kohlenwasserstoffen gebildet.<sup>3</sup>

- **Koksabbrand:** Der Koksanteil ist durch den hohen Anteil an flüchtigen Bestandteilen relativ gering und spielt deshalb bei der Beschreibung der Verbrennung nur eine untergeordnete Rolle.<sup>3</sup>

Er weist eine hohe spezifische Oberfläche und aufgrund der Trocknungs- und Entgasungsvorgänge eine sehr feine Porenstruktur auf. Der hohe Ascheanteil, der wiederum zu einem hohen Anteil aus Eisen besteht, fördert die Reaktivität für den Koksabbrand.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> TONDL 2013, S. 31

<sup>2</sup> vgl. STAMMBACH 1987

<sup>3</sup> vgl. PENTHOR 2009, S. 17

## Verhalten des Klärschlammes in der stationären Wirbelschicht

Da die flüchtigen Bestandteile einen hohen Anteil am gesamten Energieinhalt ausmachen, sind vor allem der Ort der Entgasung und Verbrennung von großer Bedeutung.

Wird der Klärschlamm ins Wirbelbett eingebracht, treten wegen des exzellenten Wärmeübergangs in der Wirbelschicht, Trocknung und Entgasung auf. Unabhängig davon ob in der verwendeten Atmosphäre Sauerstoff über- bzw. unterstöchiometrisch eingesetzt wird, kommt es im Bereich der schnell entgasenden Klärschlammteilchen zur lokalen Sauerstoffunterversorgung. Dieses Phänomen verschleppt die Oxidation der Entgasungsprodukte teilweise in den Freiraum über dem Wirbelbett (partial heat release)<sup>1</sup>. Dies führt zu einem Temperaturanstieg im Freiraum gegenüber dem Wirbelbett um bis zu 200°C.<sup>2,3</sup>

Speziell bei der Verbrennung von nassem Klärschlamm ist dies von Bedeutung, da die Wärmefreisetzung zwischen Wirbelbett und Freiraum aufgeteilt wird. Um die Betttemperatur nicht zu tief sinken zu lassen, müssen in Abhängigkeit vom Wassergehalt des Klärschlammes Stützbrennstoffe zugefeuert werden. Die Wärmefreisetzung sollte so gestaltet werden, dass die Wärme im Wirbelbett freigesetzt wird, um Stützbrennstoffe einzusparen. Bei einer hohen Betttemperatur muss das Ascheschmelzverhalten berücksichtigt werden. Jedoch muss die Temperatur im Freiraum höher als 850°C sein, um Emissionen gering zu halten.<sup>3</sup>

Weitere wichtige Faktoren, die Einfluss auf den Bereich der Entgasung und Verbrennung der flüchtigen Bestandteile nehmen ist die Durchmischungszeit des Bettmaterials sowie die Entgasungszeit des Klärschlammteilchens.<sup>3,4</sup>

## Verhalten des Klärschlammes in der zirkulierenden Wirbelschicht

Auf Basis der Erfahrungen der Klärschlammverbrennung in der stationären Wirbelschicht ist in der zirkulierenden Wirbelschicht von einem ähnlichen Verhalten des Klärschlammteilchens auszugehen. Die Betttemperatur kann mittels Wärmeabfuhr durch das umlaufende Bettmaterial geregelt werden. Dies führt zu einem Vorteil gegenüber der stationären Wirbelschicht. Speziell für einen Betrieb mit erhöhtem Sauerstoffgehalt in der Anströmung.<sup>5</sup>

## Verbrennung des Klärschlammes mit Sauerstoff angereicherter Luft

Langzeitexperimente mit Sauerstoff angereicherter Luft für die Verbrennung von mechanisch entwässertem Klärschlamm in Wirbelschichtöfen im Industriemaßstab (16 MW<sub>th</sub> Wirbelschichtofen, Fernwärme Wien GmbH) haben gezeigt, dass die Erhöhung des Sauerstoffgehaltes von 21 vol.-% auf 24 vol.-% eine starke Reduktion des Verbrauchs von hochenergetischen Sekundärbrennstoffen zur Folge hat. Dies erhöht die Kapazität des eingesetzten Klärschlammes um bis zu 30 vol.-%. Weiters wurden während den Versuchen keine

---

<sup>1</sup> TONDL 2013, S. 32

<sup>2</sup> vgl. PENTHOR 2009, S. 19

<sup>3</sup> vgl. OGADA & WERTHER 1996, S. 618

<sup>4</sup> vgl. BORGHI, SAROFIM & BEÉR 1985, S. 13f

<sup>5</sup> vgl. TONDL 2013, S. 32

negativen Effekte an der Prozessstabilität festgestellt. Der wirtschaftliche Betrieb einer solchen Anlage ist hauptsächlich vom Preis der hochkalorischen Stützbrennstoffe, des Sauerstoffes und dem Umsatz von Klärschlamm abhängig.<sup>1</sup> Eine detaillierte Beschreibung der Verbrennung mit Sauerstoff angereicherter Luft ist in der fachspezifischen Literatur vorzufinden.<sup>2</sup>

### **Oxyfuel Technologie<sup>3</sup>**

Das Oxyfuel Prinzip beruht auf der Verbrennung von Reinsauerstoff und rezirkulierendem Rauchgas. Der Reinsauerstoff wird aus einer vorgeschalteten Luftzerlegung gewonnen. Damit die Temperatur in der Brennkammer, speziell am Düsenaustritt, nicht zu hoch ansteigt wird Rauchgas rezirkuliert. Die Rauchgasmenge nach Abzug der Rezirkulation ist dadurch wesentlich geringer. Durch Wegfallen des Luftstickstoffes besteht das Rauchgas hauptsächlich aus Wasserdampf und CO<sub>2</sub>. Nach Kondensation des Wassers steht ein Gasstrom mit hoher CO<sub>2</sub> Reinheit bereit und kann als Ausgangspunkt für die Carbon Capture and Storage Anwendung eingesetzt werden.

Die Wahl der Sauerstoffkonzentration in der Anströmung ist ein zusätzlicher Freiheitsgrad für die Optimierung der Prozessführung, der speziell in Wirbelschichtanlagen genutzt werden kann. So kann beispielsweise bei der Klärschlammverbrennung auf die derzeit notwendige Zufeuerung von hochkalorischen Stützbrennstoffen verzichtet werden. Diese Monoverbrennung führt zu der gewünschten unverdünnten Klärschlammasche.

Durch Versuche an einer 100 kW<sub>th</sub> zirkulierenden Wirbelschicht konnte die Oxyfuel Verbrennung von Klärschlamm in einer realistischen Verbrennungsumgebung durchgeführt werden. Mithilfe der Ergebnisse der 100 kW<sub>th</sub> Anlage wurde ein Konzept einer 60 MW<sub>th</sub> Oxyfuel Klärschlammverwertungsanlage erstellt. Dabei wurden verschiedene Szenarien bezüglich der Verwertung des Abgasstroms in Betracht gezogen. Eine detaillierte Beschreibung der Oxyfuel-Technologie ist in der fachspezifischen Literatur vorzufinden.

---

<sup>1</sup> vgl. PENTHOR u. a. o. J., S. 7f

<sup>2</sup> PENTHOR u. a. o. J.

<sup>3</sup> TONDL 2013, S. 33

## 2.5.1 Klärschlammmitverbrennung in Zementwerken<sup>1</sup>

Es besteht neben der Entsorgung des Klärschlammes in Monoverbrennungsanlagen auch die Möglichkeit diesen mit zu verbrennen. Diese Mitverbrennung findet vor allem in Abfallverbrennungsanlagen, Kohlekraftwerken und Zementwerken statt. Im Allgemeinen wird nur stabilisierter Klärschlamm mitverbrannt, da Rohschlamm große Schwierigkeiten bei der Handhabung und Lagerung mit sich bringt. Es werden hauptsächlich Klärschlämme eingesetzt, die der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) genügen. Jedoch macht sich der zusätzliche Eintrag von Schwermetallen bei den Emissionswerten bemerkbar.

Seit Jahrzehnten bestehen die in der Zementindustrie verwendeten Einsatzstoffe aus Abfällen, da die Zementindustrie ein sehr energieintensiver Prozess ist und beispielsweise Klärschlamm fossile Brennstoffe ersetzen kann. Eine Substitution von fossilen Brennstoffen resultiert in einer Kosten- und CO<sub>2</sub> Reduktion der Zementherstellung. Mit Novellierung der 17. Bundes-Immissionsschutzverordnung vom 14.08.2003 gelten die Schwermetallgrenzwerte der Müllverbrennung in vollem Umfang auch für die Mitverbrennung von Klärschlamm in Zementwerken (siehe Kapitel 2.3). Zusätzlich können die bei der Zementherstellung benötigten mineralischen Rohstoffe, wie z.B. Sand oder Eisenerz durch den mineralischen Anteil im Klärschlamm teilweise ersetzt werden. Somit kommt es durch die Mitverbrennung von Klärschlamm neben der Erhöhung der Wirtschaftlichkeit zur Klimaschonung und Entsorgung eines Abfallstroms. Nachteilig für die Mitverbrennung ist jedoch, dass Nährstoffe wie der im Klärschlamm enthaltene Phosphor für immer aus dem Kreislauf entfernt wird. Einerseits ist der Phosphor im Zement eingebunden und andererseits liegt dieser stark verdünnt in Schlacke und weiteren Verbrennungsrückständen vor. Diesbezüglich wäre vor der Mitverbrennung des Klärschlammes eine Phosphorrückgewinnung anzustreben.

### **Beschreibung der Zementherstellung<sup>2</sup>**

Die Herstellung von Zement wird anhand der Drehofenanlage im Zementwerk Mergelstetten des Unternehmens Schwenk Zement KG beschrieben. Die Herstellung von Zement erfolgt heutzutage in Ofenanlagen bestehend aus Vorwärmer, Drehrohrofen und nachgeschaltetem Klinkerkühler. Der Portlandklinker wird anschließend mit diversen weiteren Bestandteilen und Gips zu Zement vermahlen. Die Drehofenanlage 4 (Abbildung 7) wird an 320 Tagen im Jahr betrieben, mit genehmigter Klinkerkapazität von 3 400 t/d. Der Energiebedarf wird neben Steinkohle für den Regelbetrieb mit alternativen Brennstoffen gedeckt. Diese alternativen Brennstoffe sind Gewerbe-, Siedlungsabfälle; Tiermehl und Klärschlamm. Aufgrund von außergewöhnlichen Betriebsphasen müssen dennoch fossile Brennstoffe eingesetzt werden, die jährliche Substitutionsrate durch alternative Brennstoffe beträgt trotzdem ca. 90%.

---

<sup>1</sup> vgl. WIECHMANN u. a. 2012, S. 28ff

<sup>2</sup> vgl. SCHWENK ZEMENT KG 2014, S. 16f

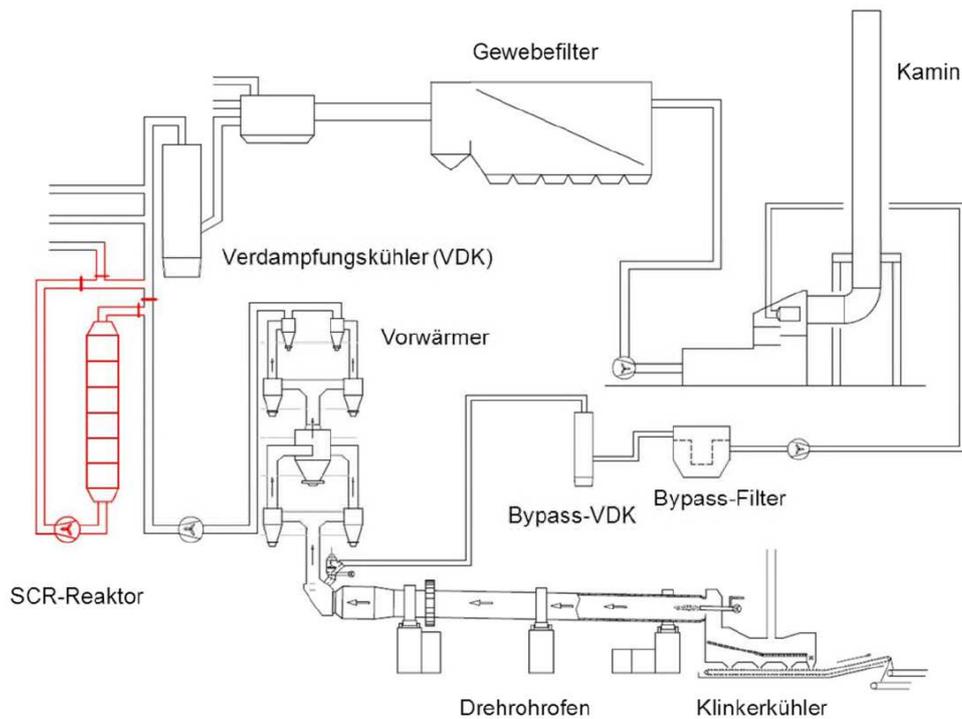


Abbildung 7: Drehhofenanlage 4 im Zementwerk Mergelstetten (Auszug aus dem Fließbild)<sup>1</sup>

Die Drehhofenanlage 4 besteht aus einem Zyklonvorwärmer, einem feuerfest ausgekleideten Drehrohrföfen (80m Länge, 5,2m Innendurchmesser) mit Bypassabzug und Klinkerkühler. Das aufbereitete, gemahlene Rohmaterial wird dem 4-stufigen Vorwärmer zwischen den beiden oberen Zyklonstufen aufgegeben. Das Rohmaterial tritt anschließend mit einer Temperatur von über 850°C in den Ofeneinlauf ein. Die Temperatur beträgt am Ofeneinlauf 1000-1200°C. Durch die Drehbewegung wird das eingebrachte Material innerhalb von ca. 40-50min in Richtung des Hauptbrenners transportiert. Dabei durchläuft das Material eine Sinterzone mit einer Temperatur von bis zu 1450°C. Der gebrannte Klinker wird anschließend nach dem Querstromprinzip konvektiv mittels Luft gekühlt. Ein Teilstrom der erwärmten Kühlluft findet als Verbrennungsluft für den Hauptbrenner Verwendung. Zur Abgasreinigung wird eine selektive katalytische Reduktion der Stickoxide sowie ein Gewebefilter eingesetzt. Der gereinigte Abgasstrom wird anschließend über einen Kamin emittiert.

<sup>1</sup> SCHWENK ZEMENT KG 2014

## 2.6 Vergasung von Klärschlamm<sup>1</sup>

Die Vergasung ist eine thermo-chemische Umwandlung bei der feste bzw. flüssige Brennstoffe unter Zufuhr von Energie in gasförmige Brennstoffe übergeführt werden.

Die Stufen der Vergasung werden in Abbildung 8 anhand der Vergasung eines mechanisch entwässerten Klärschlammteilchens erklärt. Diese Stufen laufen seriell ab und werden in Aufheizung, pyrolytische Zersetzung und Vergasung eingeteilt. Sie können in unterschiedlicher Umgebung stattfinden. Hier wird auf die Umsetzung in Gasatmosphäre (d.h. Luft-, Sauerstoff-, Kohlenstoffdioxid- und Wasserdampf-atmosphäre) näher eingegangen, da dies bei der heutigen praktischen Anwendung mehrheitlich eingesetzt wird.

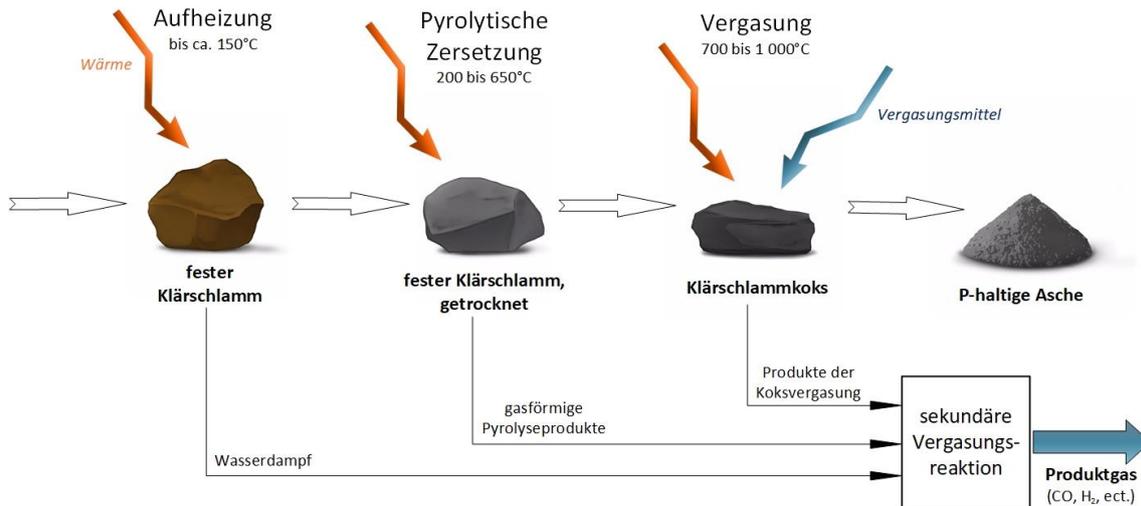


Abbildung 8: Stufen der Vergasung an einem Klärschlammteilchen als eigenständiger Prozess<sup>2</sup>

- **Aufheizung:** durch endotherme Erhitzung des Brennstoffes entweicht das freie und anschließend das in der Biomassezelle gebundene Wasser. Der vollständig getrocknete Brennstoff bleibt zurück.
- **Pyrolytische Zersetzung:** bei fortlaufender Wärmezufuhr werden die organischen Makromoleküle aufgebrochen. Diese verlassen die Brennstoffmatrix als flüchtige Bestandteile.
- **Vergasung:** durch weitere endotherme Energiezufuhr sowie einer begrenzten Zufuhr von Sauerstoff bzw. Luft kommt es bei entsprechend hohen Temperaturen zu einer Teiloxidationsreaktion. Es kommt zur Bildung eines brennbaren Gases, dem sogenannten Produktgas.

Das erhaltene Produktgas kann in weiteren Umwandlungsschritten mit Sauerstoff, unter Freisetzung von Energie, vollständig oxidiert werden. In den bestehenden Prozessstrukturen eines Zementwerks könnte das Produktgas die fossilen Energieträger teilweise ersetzen. Eine detaillierte Beschreibung der Vergasung ist in der fachspezifischen Literatur vorzufinden.

<sup>1</sup> vgl. KALTSCHMITT u. a. 2016, S. 647ff

<sup>2</sup> vgl. KALTSCHMITT u. a. 2016, S. 668

## 2.6.1 Klärschlammvergasung an der der TU Wien<sup>1</sup>

Die Vergasung von Brennstoffen erfolgt in einer 100 kW<sub>th</sub> Zweibett-Wirbelschicht-Vergasungsanlage der TU Wien. Anhand dieser Pilotanlage wird das Prinzip der Zweibett-Wirbelschicht-Vergasung erläutert.

Die Zweibett-Wirbelschicht-Anlage ist in zwei miteinander verbundenen Reaktoren unterteilt und wird bei atmosphärischem Druck betrieben.<sup>2</sup> Das Reaktorkonzept (dual fluidized bed, DFB) beinhaltet eine dampfbetriebene blasenbildende Wirbelschicht (bubbling fluidized bed, BFB) im Vergasungsreaktor (gasification reactor, GR) sowie eine luftbetriebene transportierende Wirbelschicht (fast fluidized bed, FFB) im Verbrennungsreaktor (combustion reactor, CR).

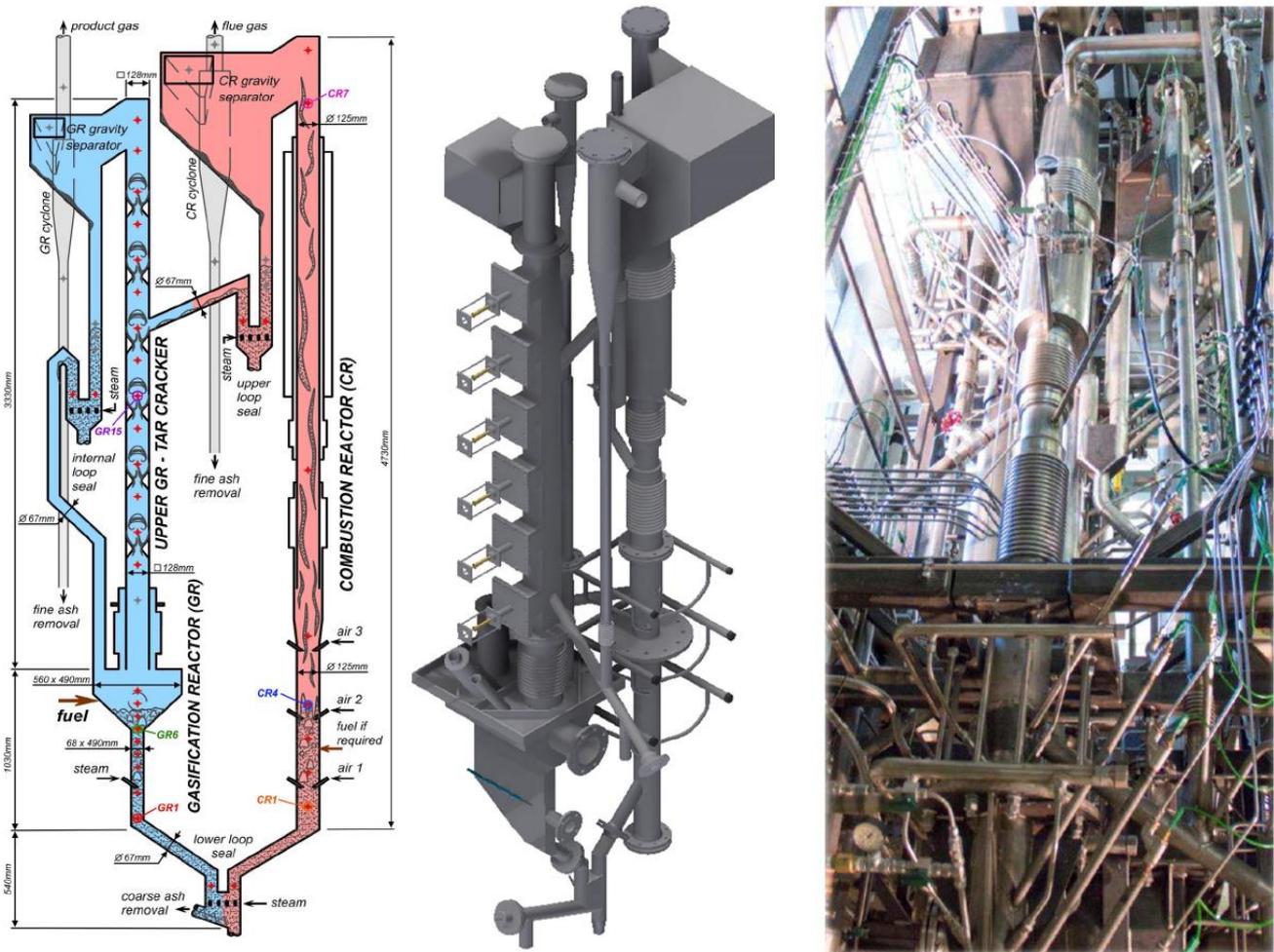


Abbildung 9: 100 kW<sub>th</sub> Vergasungsanlage der TU Wien Stand 2019<sup>3</sup>; Prinzipskizze mit Abmessungen (links), 3D Darstellung der Anlage (mitte), Bild des Verbrennungsreaktors ohne thermische Isolierung (rechts)<sup>4</sup>

Siphone ermöglichen eine kontinuierliche Zirkulation von Feststoffen, vorwiegend Bettmaterial, zwischen den Reaktoren. Durch die Feststoffzirkulation wird Wärme in die Vergasungszone eingebracht. Die Wärmeübertragung sowie die Umwandlung der Brennstoffe zu einem wasserstoffreichen Produktgas mit

<sup>1</sup> vgl. SCHMID u. a. 2012

<sup>2</sup> vgl. WILK u. a. 2011, S. 91

<sup>3</sup> SCHMID, BENEDIKT, u. a. 2019, S. 5

<sup>4</sup> BARTIK u. a. 2019, S. 14

hohem spezifischen Energieinhalt, erfolgt beim Kontakt mit dem Bettmaterial innerhalb des BFB. Der Wärmebedarf für die Vergasung wird durch die Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Partikeln und zusätzlichen Brennstoffen wie Heizöl etc. bereitgestellt. Die Verbrennungsreaktion erfolgt in der FFB mittels Luft. Der transportierende Charakter der Verbrennungszone ist erforderlich, um die notwendige Zirkulation zu gewährleisten. Eine detaillierte Beschreibung der Fluidisierungsregime bzw. Strömungsregime ist in der fachspezifischen Literatur vorzufinden.<sup>1</sup>

Die Fluidodynamik sowie die chemischen Reaktionen im inneren der Wirbelschicht verlaufen sehr komplex ab. Deshalb sind experimentell ermittelte Daten im Bereich der Forschung und Entwicklung der Zweibett-Wirbelschicht-Vergasung von signifikanter Bedeutung.

## Vergasungsversuch

Die nachfolgenden Ergebnisse der Klärschlammvergasung sind Resultate von Experimenten, die an der 100 kW<sub>th</sub> Vergasungsanlage der TU Wien 2012 durchgeführt wurden. Mittlerweile wurde diese Versuchsanlage modifiziert, um bei Abfall- und Reststoffen eine effizientere Verwertung zu gewährleisten. Aufgrund des Skalierungspotenzials der Zweibett-Wirbelschicht-Vergasung sind die folgenden Ergebnisse repräsentativ für Industrieanlagen, sofern diese mit der DFB-Technologie betrieben werden. Die Probenaufbereitung für die durchgeführten Analysen erfolgte in Anlehnung an DIN 51701.<sup>2</sup>

## Prozessbedingungen

Der Vergasungsversuch des Klärschlammes wurde bei einer Betriebstemperatur von 810°C durchgeführt. Dies entspricht der Temperatur im BFB. Die Auflistung der verwendeten Prozessparameter ist in Tabelle 7 angeführt. Weitere Prozessbedingungen sind der spezifischen Literatur zu entnehmen.

Tabelle 7: Prozessparameter des Vergasungsversuches<sup>3</sup>

Parameter	Einheit	Vergasungsreaktor	Verbrennungsreaktor
Fluidisierungszustand	-	bubbling fluidized bed	fast fluidized bed
Wasserdampf/Brennstoffverhältnis	kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>tr</sub>	0,8 - 1,1	-
Thermische Energie	kW	feed: 66 - 97	fuel: 22 - 31
Temperatur	°C	800 - 810	840 - 900

Als Bettmaterial wurde Olivinsand mit einem mittleren Partikeldurchmesser von 520 µm verwendet. Die Bettmaterialcharakteristik und fluiddynamische Größen sind in Tabelle 8 aufgelistet.

<sup>1</sup> SCHMID 2014

<sup>2</sup> KOHL & PADOUVAS 2007, S. 2

<sup>3</sup> vgl. SCHMID u. a. 2012, S. 207

Tabelle 8: Eigenschaften und fluiddynamische Größen des verwendeten Bettmaterials<sup>1</sup>

Parameter	Einheit	allgemeine Prozessparameter
Bettmaterial	-	Olivin
Partikeldichte	kg/m <sup>3</sup>	2850
mittlerer Partikeldurchmesser, dp <sub>50</sub>	µm	520
Größenverteilung, dp <sub>10</sub> -dp <sub>90</sub>		450 - 630
minimale Fluidisierungsgeschwindigkeit, U <sub>mf</sub>	m/s	0,1 - 0,2
Schwebegeschwindigkeit, U <sub>t</sub>		4,5 - 6,9

Die Feststoffzufuhr des Klärschlammes erfolgte mittels Förderschnecke direkt in die Zone des BFB.

### Klärschlamm

Der Klärschlamm wurde ohne Zugabe von Lösungsmittel pelletiert. Die geometrischen, kalorischen Eigenschaften, der Asche-, Wassergehalt sowie Anteil flüchtiger Bestandteile der Klärschlammpellets werden in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Geometrische, kalorische Eigenschaften; Asche-, Wassergehalt sowie Anteil flüchtige Bestandteile<sup>2</sup>

Parameter	Einheit	Klärschlammpellets
mittlerer Durchmesser	mm	Ø7,5
Länge		8-15
Schüttdichte	kg/m <sup>3</sup>	760
Heizwert, trocken (DIN 51900 T2)	kJ/kg <sub>tr</sub>	12420
Heizwert, feucht	kJ/kg <sub>feucht</sub>	10800
Wassergehalt (DIN 51718)	mass.-%	11,0
Aschegehalt (DIN 51719)	mass.-% <sub>tr</sub>	41,5
Anteil flüchtige Bestandteile (DIN 51720)		55,4
Anteil flüchtige Bestandteile, aschefrei	mass.-% <sub>tr,af</sub>	94,70

Da die erzeugten Pellets eine ausreichende mechanische Festigkeit hatten erfolgte keine Pulverisierung in der Wirbelschicht. Bettmaterialproben des bodennahen Siphons (lower loop seal) zeigten, dass die Partikel aus der Vergasungszone dieselbe Form wie die eingebrachten Pellets hatten. In Tabelle 9 ist ersichtlich, dass der Aschegehalt von Klärschlammpellets signifikant hoch ist. Das Ascheschmelzverhalten ist in Tabelle 10 ersichtlich.

<sup>1</sup> vgl. SCHMID u. a. 2012, S. 207

<sup>2</sup> vgl. SCHMID u. a. 2012, S. 208

Tabelle 10: Ascheschmelzverhalten nach DIN 51730<sup>1</sup>

Parameter	Einheit	Klärschlamm pellets
Erweichungstemperatur A	°C	1140
Fließtemperatur D	°C	1240

Zur Ermittlung der Hauptbestandteile wurde eine Elementanalyse durchgeführt. Die Tabelle 11 zeigt die Hauptelemente der wasserfreien und wasser-, aschefreien Analyse der Klärschlamm pellets.

Tabelle 11: Hauptelemente, wasserfrei sowie wasser-, aschefrei<sup>1</sup>

Parameter	Einheit	Klärschlamm pellets	Einheit	Klärschlamm pellets
Aschegehalt		41,5		-
C	mass.-% <sub>tr</sub>	29,7	mass.-% <sub>tr,af</sub>	50,7
H		3,7		6,3
O		20,2		34,5
N		3,9		6,67
S nach CEN/TS 15289		1,01		1,73
Cl nach CEN/TS 15289		0,05		0,09

Auffallend ist der hohe Stickstoffgehalt der Klärschlamm pellets. Da der Klärschlamm bzw. die Klärschlamm asche für die Phosphorrückgewinnung vorgesehen sind wurde eine Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) zur Ermittlung der mineralischen Aschebestandteile durchgeführt. Diese Analyseergebnisse sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Elemente in der Asche (RFA Analyse), trocken, frei von Kohlenstoff und Sauerstoff<sup>1</sup>

Element	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K
Einheit	mass.-% <sub>tr</sub>							
Wert	<1	<3	6-10	13-16	8-12	2-4	<0,1	2-5
Element	Ca	Ti	V	Mn	Fe	Cu	Zn	Cr, Co, Ni, As
Einheit	mass.-% <sub>tr</sub>							
Wert	25-30	<3	<0,5	<0,5	24-30	<0,5	<1	<5x10 <sup>-2</sup>

Die Ascheanalyse wurde direkt am Ausgangsmaterial durchgeführt. Die unter Laborbedingungen erzeugte (DIN 51719) und analysierte Asche kann nicht direkt mit den Ascheproben der Verbrennungs-, bzw. Vergasungsanlage verglichen werden, da die Aschezusammensetzung je nach Anfallsort variiert. Sie kann als Bettasche, Zyklonasche oder Filterasche anfallen. Durch Reibung und Verschleiß verursachter Abtrag verunreinigt die Bettasche. Weiters sind die Werte der Parameter maßgebend vom Ursprung des Ausgangsmaterial abhängig. Folglich geben die ermittelten Werte der Elementaranalyse und RFA nur Aufschluss über die tatsächlich vorliegenden und verwendeten Ausgangsmaterialien.

<sup>1</sup> vgl. SCHMID u. a. 2012, S. 209

## Gaszusammensetzung

Die Hauptgaskomponenten wie H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> wurden mit dem Messgerät „Rosemount NGA2000“ analysiert und sind in Tabelle 13 ersichtlich. Ethen (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), Ethan (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), Propan (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) und Stickstoff (N<sub>2</sub>) wurden mit dem Gaschromatographen Syntech Spetras GC 955 gemessen. In Tabelle 14 werden diese Messwerte als Bereich angegeben.

Tabelle 13: Hauptgaskomponenten im trockenen Produktgas<sup>1</sup>

Gas	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
<b>Einheit</b>	vol.-% <sub>tr</sub>			
<b>Wert</b>	39,2	16,3	25,4	7,8

Aufgrund des hohen Stickstoffgehaltes der Klärschlamm-Pellets ist bei der Vergasung mit einem signifikanten Anteil an Ammoniak (NH<sub>3</sub>: 3,44 vol.-%<sub>tr</sub>) zu rechnen. Untersuchungen von stickstoffreichen Ausgangsmaterialien ergaben ähnliche Anteile. In Tabelle 14 sind weitere Produktgaskomponenten angeführt.

Tabelle 14: sekundäre Komponenten im trockenen Produktgas<sup>1</sup>

Gas	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> und C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	N <sub>2</sub>	Rest: C <sub>4</sub> -, C <sub>5</sub> -Kohlenwasserstoffe, NH <sub>3</sub> und H <sub>2</sub> S	H <sub>2</sub> O
<b>Einheit</b>	vol.-% <sub>tr</sub>				vol.-%
<b>Wert</b>	1,5 - 3,5	0,5 - 1,5	0,5 - 2,0	1,0 - 4,0	40 - 55

Für die Analyse von Teer, Flugkoks und mineralischem Staub im Produktgas wurde eine genormte Probennahme, -analyse nach CEN/TS 15439 durchgeführt. Das genaue Messschema ist in der spezifischen Literatur dargestellt. Es wurden jeweils mindestens drei Proben entnommen und die gemittelten Werte in Tabelle 15 sowie Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 15: Anteile von Flugkoks und mineralischem Staub im trockenen Produktgas<sup>2</sup>

Parameter	Einheit	Klärschlamm pellets
Flugkoks	g/m <sup>3</sup> <sub>stp</sub>	3,2
mineralischer Staub	g/m <sup>3</sup> <sub>stp</sub>	68,4

In Tabelle 15 ist zu erkennen, dass der mineralische Staubanteil im trockenen Produktgas bei der Vergasung von Klärschlamm pellets signifikant ist. Dieser hohe Staubanteil ist auf den hohen Aschegehalt zurückzuführen. Der produzierte Flugkoksanteil ist im Vergleich zum mineralischen Staubanteil verhältnismäßig gering.

<sup>1</sup> vgl. SCHMID u. a. 2012, S. 210

<sup>2</sup> vgl. SCHMID u. a. 2012, S. 211

Tabelle 16: Gravimetrischer Teer und Summe des GCMS (Kopplung einer Gaschromatographie mit einem Massenspektrometer ) gemessenen Teers im trockenem Produktgas<sup>1</sup>

Teerart	gravimetrischer Teer	GCMS Teer
Einheit	g/m <sup>3</sup> <sub>stp</sub>	g/m <sup>3</sup> <sub>stp</sub>
Wert	3,9	8,2

Die Teerinhaltstoffe sind in Tabelle 17 ersichtlich. Der gemessene Teer weist mit 5,4 mass.-% einen hohen Anteil an aromatischen stickstoffhaltigen Komponenten auf. Diese Komponenten bestehen hauptsächlich aus Quinolin, Isoquinolin, Indol, Carbazole.

Tabelle 17: Teerinhaltstoffe<sup>1</sup>

Teerinhaltstoffe	Phenole	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe	Furane	aromatische Komponenten	aromatische stickstoffhaltige Komponenten
Einheit	mass.-%				
Wert	0,5	75,9	0,7	17,6	5,4

Eine detaillierte Beschreibung der Teerarten ist in der fachspezifischen Literatur vorzufinden.<sup>2,3</sup> Anhand der Gaszusammensetzung konnte der Heizwert des Produktgases nicht berechnet werden, da die sekundären Komponenten im Produktgas für Klärschlamm nicht exakt vorliegen.

## 2.6.2 Ergebnisse der Klärschlammvergasung an der Universität von Canterbury, Christchurch, Neuseeland

Bei diesen Versuchen wurde die Verwendbarkeit von getrocknetem Klärschlamm zur Co-Vergasung von Holz untersucht. Die Versuche wurden an einer 100 kW Zweibett-Wirbelschicht-Vergasungsanlage der Universität von Canterbury, Christchurch, Neuseeland in Kooperation mit der TU Wien durchgeführt. Der Klärschlammanteil im Feed wurde schrittweise von 10% bis 100% gesteigert und bei jedem Versuch die durchschnittliche Gaszusammensetzung und der Kaltgaswirkungsgrad bestimmt.<sup>4</sup>

Bei steigendem Klärschlammanteil im Feed stieg der Anteil an N<sub>2</sub> im Produktgas stark an, der Gehalt von H<sub>2</sub> nahm ebenfalls zu. Der Gehalt von CO, CO<sub>2</sub> nahm kontinuierlich ab, der Gehalt von CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> und C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> blieb annähernd konstant. Weiters stieg der Aschegehalt bei steigendem Klärschlammanteil, der eine sinkende Produktgasausbeute zur Folge hatte.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> vgl. SCHMID u. a. 2012, S. 211

<sup>2</sup> WOLFESBERGER-SCHWABL 2013

<sup>3</sup> WOLFESBERGER, AIGNER & HOFBAUER 2009

<sup>4</sup> SCHABAUER 2009, S. 3f

<sup>5</sup> SCHABAUER 2009, S. 67

## 2.7 Phosphorrückgewinnungsverfahren

Bei der Phosphorrückgewinnung aus Abwasser werden die Verfahren je nach Edukt sowie zugrundeliegenden P-Abtrennmechanismus eingeteilt. Die Einteilung nach den Edukten, aus denen der Phosphor rückgewonnen wird, ist in Tabelle 18 ersichtlich:

Tabelle 18: Einteilung der Edukte aus denen der P rückgewonnen wird<sup>1</sup>

Abwasser		
flüssige Phase (Ablauf, sowie vorwiegend Schlammwasser)	Faul- und Klärschlamm	Klärschlammasche

Die entwickelten P-Rückgewinnungsprozesse basieren auf unterschiedlichen physikalisch-chemischen Verfahrensprinzipien und -kombinationen und liefern demzufolge auch unterschiedliche P-Recyclatqualitäten bzw. -zusammensetzungen.<sup>2</sup>

Da in dieser Arbeit die Erzeugung von Klärschlammasche im Vordergrund steht wird nachfolgend nur auf die P-Rückgewinnungsverfahren aus der Klärschlammasche eingegangen. Aufgrund des hohen chemischen Aufwandes, der damit verbundenen Anlagen-, Materialkomplexität sowie Problematiken bei der Reststoffentsorgung der unterschiedlichsten chemischen Nebenprodukte wird auf die Beschreibung der rein chemischen Verfahren verzichtet. Thermische und thermochemische P-Rückgewinnungsverfahren aus dem Klärschlamm scheinen sich besser in die Prozessstrukturen eines Zementwerks einbinden zu lassen und werden näher betrachtet. Im Detail wird nachfolgend das AshDec Verfahren und der RecoPhos Prozess beschrieben. Ein Nebenprodukt (Silikatschlacke) des RecoPhos Prozesses wird zum derzeitigen Stand der Technik bereits in der Zementindustrie verwertet. Das AshDec Verfahren bietet aufgrund seines Prinzips Potential für die Realisierung der Schwermetallentfrachtung von Klärschlammasche.

<sup>1</sup> vgl. EGLE, RECHBERGER & ZESSNER 2014b, S. 48ff

<sup>2</sup> vgl. BORMANN & SIEVERS 2017, S. 149

## 2.7.1 RecoPhos Prozess

Mit dem RecoPhos Prozess wird Phosphor aus Klärschlammaschen bei hohen Temperaturen unter reduzierenden Bedingungen elementar gewonnen und anschließend zu Phosphorsäure ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) umgesetzt. Der RecoPhos Prozess wandelt einen problematischen Abfall in mehrere Ströme von Sekundärrohstoffen um und hinterlässt dabei ein Minimum an festen Abfällen. Die produzierte Phosphorsäure findet als Produkt einen großen Anwendungsbereich in vielen Industriezweigen. Bezüglich der Pflanzenverfügbarkeit kann Phosphorsäure im Bereich der schnell verfügbaren Phosphorquellen verwendet und als Düngemittelzusatz beigemischt werden.<sup>1</sup> Ein weiteres mögliches Produkt des Prozesses ist die Gewinnung von elementarem Phosphor, auch als weißer Phosphor ( $\text{P}_4$ ) bezeichnet, durch Kondensation.<sup>2</sup>

### Prozessbeschreibung<sup>3</sup>

Der in der Asche enthaltene Phosphor liegt gebunden in Form von Phosphaten vor. Die Phosphate reagieren unter Anwesenheit von Siliziumdioxid und Kohlenstoff bei sehr hohen Temperaturen (min.  $1500^\circ\text{C}$ ) zu gasförmigem Phosphor, CO, Silikatschlacke und einer metallischen Fraktion. Die wichtigste Form an Phosphaten in Phosphaterzen ist das Calcium-Phosphat. Dieses Phosphat ist auch in der Klärschlammasche wiederzufinden und stellt eine große Herausforderung für den Prozess dar. Die carbo-thermische Reduktion von Calcium-Phosphat findet nur bei hohen Temperaturen und sehr geringem Sauerstoffpartialdruck statt. Aus diesem Grund werden in der konventionellen Phosphorherstellung aus Phosphaterzen Elektrolichtbogenöfen verwendet. In diesen Öfen kann der Sauerstoffpartialdruck minimal gehalten werden, da für die Energieeinbringung keine Oxidation von Energieträgern stattfindet.

Die Kerntechnik des RecoPhos Prozesses ist der InduCarb-Reaktor. Im InduCarb-Reaktor erfolgt der erforderliche Energieeintrag über eine Induktivheizung und gewährleistet dadurch das Erreichen der notwendigen Reaktionsbedingungen. Die Beheizung der Graphitschüttung erfolgt mittels wassergekühlten Induktionsspulen. Der für die Reaktion erforderliche Kohlenstoff muss zudosiert werden. In Abbildung 10 ist eine vereinfachte Darstellung des InduCarb-Reaktors ersichtlich.

---

<sup>1</sup> vgl. SCHÖNBERG, SAMIEL, KERN & RAUPENSTRAUCH 2014, S. 403f

<sup>2</sup> vgl. SCHÖNBERG & RAUPENSTRAUCH 2015, S. 484

<sup>3</sup> vgl. SCHÖNBERG u. a. 2014, S. 404ff

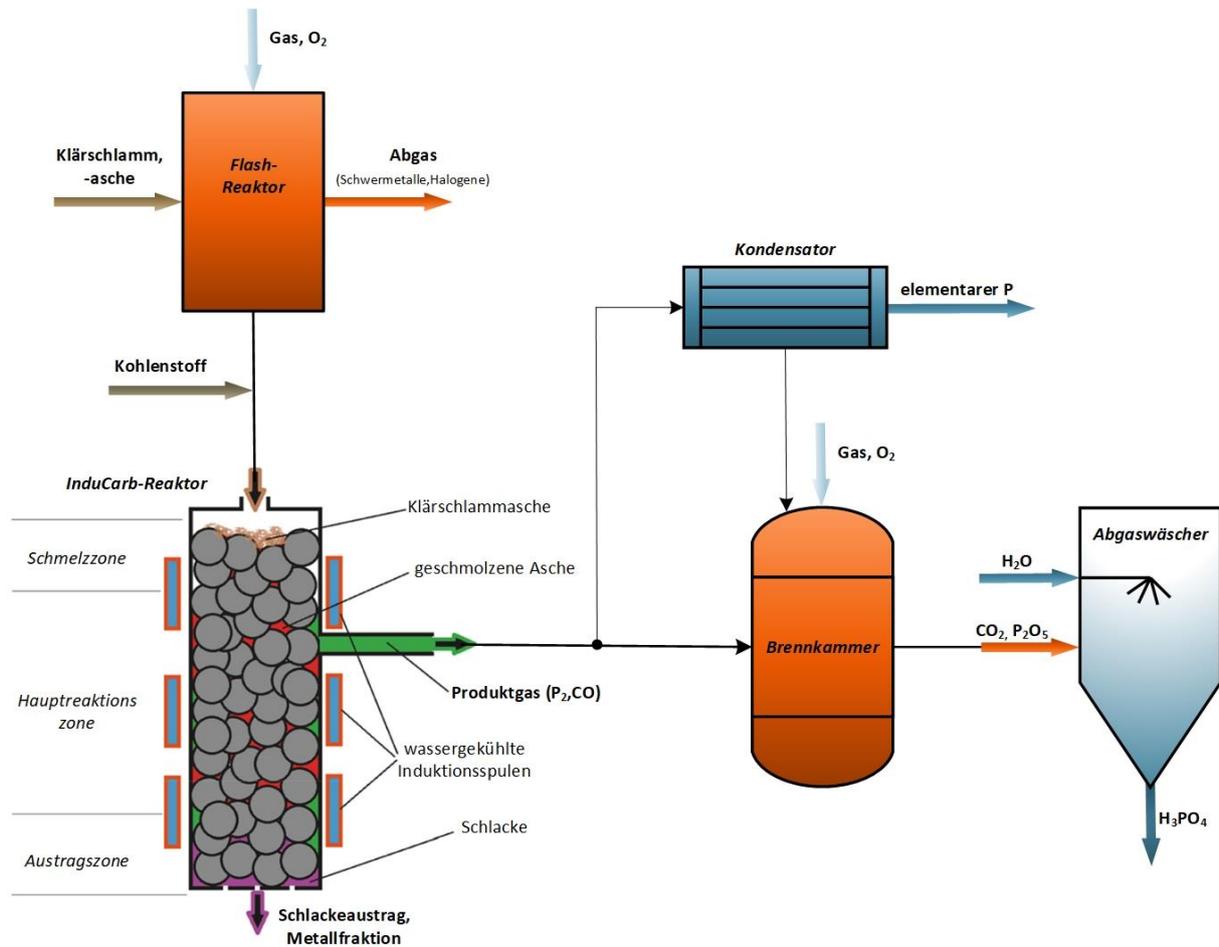


Abbildung 10: Aufbau des zweistufigen RecoPhos Prozesses (Schwermetallabtrennung mittels Flash-Reaktor und P-Kondensation)<sup>1</sup>

Die folgende Reaktion läuft in der induktiv beheizten Graphitschüttung ab:



Die weiteren Phosphate wie z.B. Eisen(III)-phosphat ( $\text{FePO}_4$ ) und Aluminiumorthophosphat ( $\text{AlPO}_4$ ) werden ebenfalls im Reaktor reduziert. Die austretende flüssige Phase besteht aus Silikatschlacke und einer Metallfraktion mit hohem Eisengehalt. Die Silikatschlacke kann in der Zementindustrie Verwendung finden, während die eisenhaltige Metallfraktion in der Metallindustrie als Wertstoff genutzt werden kann.

Das entstandene Produktgas (im wesentlichen CO und Phosphor) wird anschließend in einer Brennkammer zu  $\text{P}_2\text{O}_5$  und CO oxidiert. In einem darauffolgenden Abgaswäscher reagiert das  $\text{P}_2\text{O}_5$  mit dem Waschwasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) zu  $\text{H}_3\text{PO}_4$ . Die gebildete  $\text{H}_3\text{PO}_4$  stellt das Hauptprodukt des Prozesses dar.

Eine Optimierung des Verfahrens bietet die Realisierung eines zweistufigen Prozesses (siehe Abbildung 10), in denen Schadstoffe durch den Betrieb einer vorgeschalteten Hochtemperatur-Verbrennungsanlage (Flash-Reaktor) entfernt werden können. In der Atmosphäre dieser Hochtemperatur-Verbrennungsanlage können die Schwermetallverbindungen und Halogene aus der Asche reagieren und mit dem Abgas abgeführt werden. Dadurch können sie nicht mehr in den InduCarb-Reaktor eingebracht werden und der Phosphor im Produktgas

<sup>1</sup> vgl. SCHÖNBERG u. a. 2014, S. 407

kann, als alternative zur Oxidation in der Brennkammer, schwermetall- bzw. halogenfrei als elementarer (weißer) Phosphor auskondensiert werden. Somit fallen im gesamten Prozess nur geringfügige Abfallströme (vorwiegend Schwermetalle, Halogene) an.

Weißer Phosphor findet weiters in der Rüstungsindustrie als reaktive Substanz in Leucht- und Rauchmunition Verwendung, da es an Luft bzw. mit der Luftfeuchtigkeit heftig reagiert. Demensprechend sind angepasste Sicherheitsvorkehrungen bei der Hantierung und dem Umgang zu treffen.

## 2.7.2 AshDec Verfahren

Das AshDec Verfahren dient zur thermochemischen Behandlung von Klärschlammasche und wird seit einigen Jahren von der Firma Outotec als Outotec-Verfahren (Synonym zu AshDec-, SUSAN-, BAM-Verfahren) weiterentwickelt.<sup>1</sup>

Dieses thermochemische Verfahren zielt nicht auf die Abtrennung des Phosphors aus der Klärschlammasche ab und ist somit kein herkömmliches P-Rückgewinnungsverfahren. Stattdessen werden Schwermetalle entfrachtet und die phosphorreiche Asche hinsichtlich Schadstoffbelastung konditioniert. Weiters dient es zur Erzeugung einer mineralischen P-Verbindung, die eine höhere Pflanzenverfügbarkeit aufweist. Der Phosphor verbleibt mit einigen wichtigen Nährstoffen (Ca, K, Mg) und weiteren Elementen (Si, Al, Fe) quasi vollständig im Hauptmassenstrom. Sofern die Grenzwerte für Schwermetalle eingehalten werden wird demnach ein Großteil der Klärschlammasche (ca. 98 mass.-%) in ein marktfähiges Düngemittel übergeführt und kann direkt als Dünger landwirtschaftlich verwertet werden. Der restliche Anteil der Klärschlammasche wird in der Gasreinigung abgeschieden.<sup>2</sup>

### Prozessbeschreibung<sup>3</sup>

Die thermochemische Behandlung von Klärschlammasche zielt darauf ab die Schwermetalle durch Verdampfung unterhalb des Ascheschmelzpunktes zu entfernen. In Abbildung 11 ist das Prinzip des AshDec Verfahrens dargestellt.

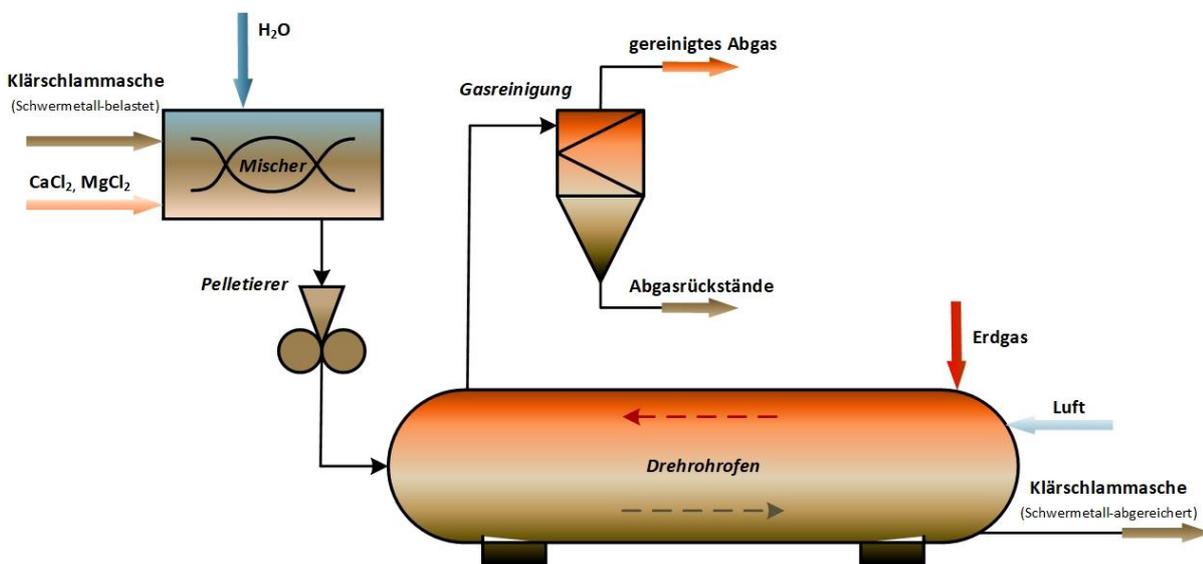


Abbildung 11: AshDec Verfahren<sup>4</sup>

Zunächst wird eine phosphathaltige Klärschlammasche mit einem Donator wie z.B. umweltverträgliche Chlorverbindungen (Calciumchlorid (CaCl<sub>2</sub>) und/oder Magnesiumchlorid (MgCl<sub>2</sub>)) versetzt. Diese Additive werden in destilliertem Wasser gelöst, mit der Asche vermischt und dem thermischen Behandlungsprozess

<sup>1</sup> MONTAG u. a. 2014, S. 68

<sup>2</sup> vgl. ADAM u. a. 2008, S. 56f

<sup>3</sup> vgl. NOWAK u. a. 2010, S. 324ff

<sup>4</sup> vgl. NOWAK u. a. 2010, S. 324

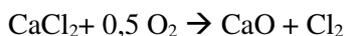
zugeführt. Alternativ können die Additive mit der Klärschlammasche pelletiert werden. Das Gemisch bzw. die Pellets werden anschließend der ca. zwanzigminütigen thermischen Behandlung zugeführt. In geschlossenen Systemen wie z.B. erdgasbefeuerten Drehrohröfen reagieren die Schwermetalle bei Temperaturen von 900 - 1100°C zu den entsprechenden Chloriden und werden verdampft. Das mit Schwermetallchloriden angereicherte Abgas wird ausgetragen, die Schwermetallverbindungen über einen Nasswäscher abgeschieden und weiter aufbereitet. Der verbleibende feste phosphorhaltige Ascherest wird intensiv gemischt und je nach Bedarf unter Zugabe von P, Ca, K, Mg etc. zu einem Dünger mit handelsüblicher Zusammensetzung verarbeitet.<sup>1</sup> Weiters kann eine Chlor-Recyclinganlage zur Wiedergewinnung von Additiven in die Prozessstrukturen eingebunden werden.

Die Reaktionen zur Bildung von gasförmigen Schwermetallverbindungen wie Cd(OH)<sub>2</sub>, CdO, CrO<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>, (CuCl)<sub>2</sub>, CuCl, NiCl<sub>2</sub>, PbO, PbCl<sub>2</sub>, ZnCl<sub>2</sub> etc. stehen im Wettstreit mit den Reaktionen bei denen die Schwermetalle mit Matrixverbindungen (vorwiegend SiO<sub>2</sub> und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) interagieren. Vor allem Zn bildet ein stabiles ZnSiO<sub>3</sub> und ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. Stabile Verbindungen wie Silikate und Aluminate, in denen Schwermetalle gebunden sind verringern somit den Anteil an austragbaren Schwermetallen. An dieser Stelle sei weiter erwähnt, dass Aluminate stabiler sind als Silikate.

Durch dieses Verfahren ist eine weitgehende Entfrachtung der Schwermetallen Pb, Cd, Cu und Zn von > 90 mass.-%, von Mo > 80 mass.-% und von Sn > 70 mass.-% möglich.

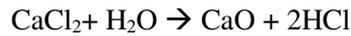
#### Donator:

Als Donator bezeichnet man im Allgemeinen eine Verbindung bzw. ein Molekül, dass während einer chemischen Reaktion ein Teilchen oder eine funktionelle Gruppe abgibt. Zur Schwermetallabreicherung können unterschiedliche Verbindungen verwendet werden. Diese Verbindungen sind vorwiegend chlorhaltige Verbindungen wie Chlorgas (Cl<sub>2</sub>), gasförmige Salzsäure (HCl), feste Pulver wie etwa CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub> und Kaliumchlorid (KCl)) aber auch chlorfreie Alkaliverbindungen wie Natriumsulfit (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) und Natriumhydrogencarbonat (NaHCO<sub>3</sub>). Der wirkungsvollste Chlordonator ist Cl<sub>2</sub>, da im Vergleich zu den anderen Donatoren die Schwermetalle As, Cr und Ni signifikant abgereichert werden. Der apparative und finanzielle Aufwand für die sichere Verwendung von Cl<sub>2</sub> ist jedoch sehr hoch. Gasförmige HCl ist ebenfalls ein effektiver Donator, jedoch können Cr und Ni nur schwer abgereichert werden. Calcium-, Magnesium- und Kaliumchlorid reagieren ähnlich gut und können als kostengünstiges Pulver mit der Asche pelletiert werden. Die Abreicherung von As, Cr und Ni findet kaum statt, mit KCl ist lediglich die Abreicherung von Cu geringfügig besser. Bei der Verfahrensmodifikation unter Zugabe von Karbonaten erfolgt keine Entnahme von Cu und einer geringen Entnahme von Zn und Pb. Abhängig von der Atmosphäre und dem Wassergehalt werden gasförmige HCl und Cl<sub>2</sub> bei der Verwendung von CaCl<sub>2</sub> ebenfalls in geringen Mengen gebildet. Bei einer oxidierenden Atmosphäre um ein trockenes CaCl<sub>2</sub> Partikel findet folgende Reaktion statt:

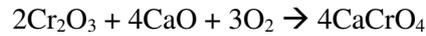


<sup>1</sup> vgl. SEILER 2010, S. 744

Bei feuchter Atmosphäre um ein  $\text{CaCl}_2$  Partikel findet folgende Reaktion statt:



Thermodynamische Gleichgewichtsberechnungen haben gezeigt, dass Wasser einen negativen Effekt auf die Abreicherung von Cr, Ni und Zn hat. Beispielhaft wird in der folgenden Reaktion gezeigt, wie Calciumoxid ( $\text{CaO}$ ) mit einem Schwermetall weiterreagiert. Hierbei reagiert  $\text{CaO}$  mit Chrom(III)-oxid ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) zu Calciumchromat  $\text{CaCrO}_4$ :



## Versuche zur Schwermetallabreicherung

In den folgenden Kapiteln werden Versuche sowie Ergebnisse des AshDec Verfahrens vorgestellt und erläutert.

### EU-Projekt SUSAN<sup>1</sup>

Im Zuge des EU-Projektes SUSAN wurden sieben verschiedene Klärschlammaschen in einem indirekt elektrisch beheizten Labordrehrohrföfen unter systematischer Variation der Betriebsparameter thermisch behandelt. Das Schema des experimentellen Aufbaus ist in Abbildung 12 ersichtlich. Bei den Versuchen wurden die Betriebsparameter Temperatur, Verweilzeit, Chlordonatortyp und Chlorkonzentration variiert. Die Betriebsparameter sind in Tabelle 19 vorzufinden.

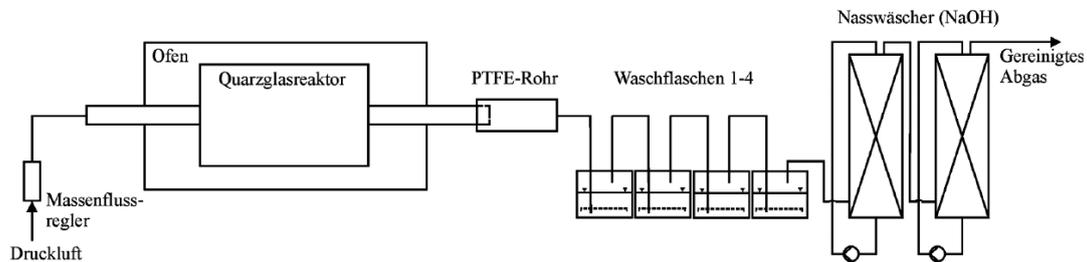


Abbildung 12: Schema des experimentellen Aufbaus für thermochemische Versuche<sup>2</sup>

Vor dem Versuch wurde je nach Kombination der Betriebsparameter eine definierte Menge eines Chlordonators in Wasser gelöst und mit der Klärschlammasche intensiv vermischt. Die Probeneinwaage wurde in den Quarzglasreaktor eingebracht. Der Quarzglasreaktor wurde kontinuierlich mit Luft durchströmt. Das Gas wurde nach Austritt aus dem Reaktor zur Abkühlung durch ein PTFE-Rohr und anschließend zur Absorption der Gasinhaltsstoffe durch vier Wasserwaschflaschen und zwei NaOH Nasswäscher (Rieselfilmkolonnen) geleitet. Die vier Wasserwaschflaschen reichten aus, um die im Abgas enthaltenen Schwermetallverbindungen quantitativ abzuscheiden.

<sup>1</sup> vgl. ADAM u. a. 2008, S. 56ff

<sup>2</sup> ADAM u. a. 2008, S. 56

Tabelle 19: Betriebsparameter der Versuche im EU-Projekt SUSAN<sup>1</sup>

Parameter	Einheit	Wert
Temperatur	°C	750-1000
Verweilzeit	min	20-120
Chlordonator	-	MgCl <sub>2</sub> , CaCl <sub>2</sub>
Chlorkonzentration	mass.-%Cl in Asche	5-20
Wassergehalt	mass.-%	30
Probeneinwaage	g	400
Luftvolumenstrom	l/min	3
Gasgeschwindigkeit	cm/s	0,28
Gasverweilzeit	min	1,2
Analysen	-	RFA (Panalytical, MagiX-pro) Königswasserauflschluss bei 200°C (Mikrowelle; MLS GmbH, HPR-1000/10 S) ICP-OES

Das salzsaure Schwermetallkonzentrat in den Waschflaschen wurde durch Zugabe von Calciumhydroxid (Ca(OH)<sub>2</sub>) auf einen pH-Wert von zehn eingestellt. Dabei kam es zur Ausfällung der entsprechenden Schwermetallhydroxide. Nach Einstellung des pH-Wertes wurde die Suspension über einen Membranfilter (0,45 µm) filtriert und der Filterkuchen mit deionisiertem Wasser gewaschen. Nach der Trocknung wurde der Filterkuchen mit Salpetersäure (HNO<sub>3</sub>) aufgenommen und nochmals mittels ICP-OES analysiert.

<sup>1</sup> vgl. ADAM u. a. 2008, S. 56ff

## Versuchsergebnisse

Exemplarisch wird der Einfluss der Betriebsparameter auf den Grad der Schwermetallentfrachtung an einem Versuch mit  $\text{MgCl}_2$  (15 mass.-% $\text{Cl}$  in Asche) und einer Verweilzeit von 60 min dargestellt. Die Gehalte der Elemente Cd, Cu, Mo, Pb, Sn und Zn wurden durch die thermochemische Behandlung stark abgesenkt, wobei dieser Effekt mit steigender Temperatur deutlich zunahm. Bei einer Temperatur von  $1000^\circ\text{C}$  wurde der Anteil der Schwermetalle Cd, Cu, Pb und Zn um mehr als 90 mass.-% abgesenkt, für Mo und Sn lagen die Abreicherungsgrade bei größer 70 mass.-%. As, Cr und Ni wurden bei der beschriebenen Versuchsdurchführung kaum entfernt und verblieben somit nahezu vollständig in den Aschen. Zum Teil wurde K, Mn, Na und Fe in die Gasphase übergeführt. S und der zugegebene Chloridanteil wurden ebenfalls zum Großteil in die Gasphase übergeführt.

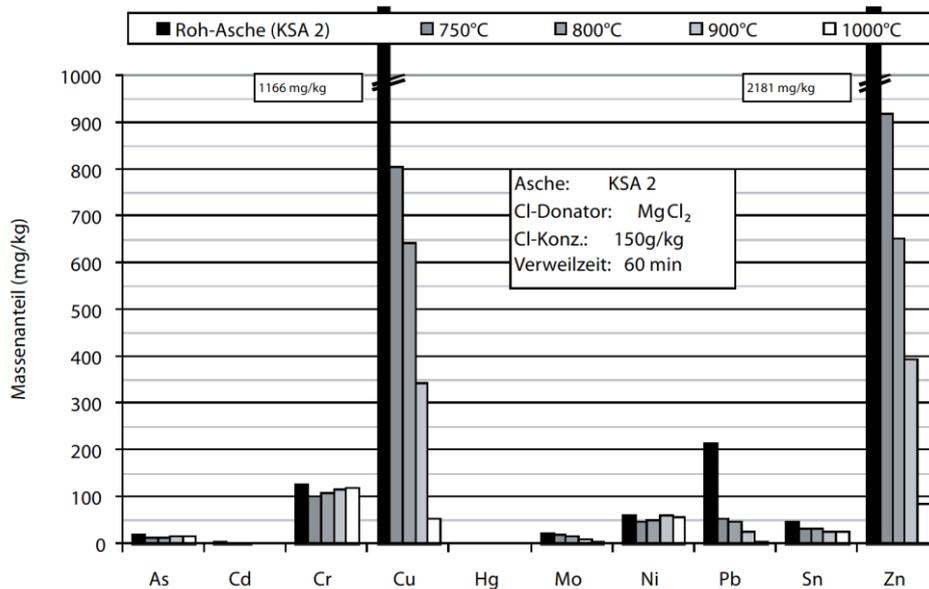


Abbildung 13: Anteil an Schwermetallen in Referenzklärschlammasche (KSA2) in Abhängigkeit der Versuchstemperatur<sup>1</sup>

Im Zuge der Variation der Betriebsparameter wurde eine Chlorkonzentration von 5-10 mass.-% $\text{Cl}$  in Asche als günstig identifiziert, da eine weitere Steigerung der Chloridkonzentration in der Asche kaum eine wesentliche Absenkung der Schwermetallgehalte bewirkte. Prinzipiell waren beide getesteten Chlordonatoren  $\text{MgCl}_2$  und  $\text{CaCl}_2$  für den thermochemischen Prozess geeignet. Eine Verweilzeit von 20 Minuten stellte sich als ausreichend heraus, da längere Verweilzeiten nicht nennenswert zur weiteren Abreicherung der Schwermetallgehalte führte. Die nachfolgende Tabelle zeigt den Überblick über die erhaltenen Erkenntnisse.

<sup>1</sup> ADAM u. a. 2008, S. 58

Tabelle 20: Erkenntnisse der durchgeführten Versuche<sup>1</sup>

Parameter	Erkenntnisse
Abreicherungserfolg	steigt mit steigender Temperatur
Günstige Verweilzeit	ca. 20min
Chlordonator	MgCl <sub>2</sub> , CaCl <sub>2</sub> geeignet
Günstige Chlorkonzentration	5-10 mass.-%Cl in Asche
Abreicherung bei 1000°C	Cd, Cu, Pb, Zn: > 90mass.-% Mo, Sn: > 70mass.-% As, Cr, Ni: kaum K, Mn, Na, Fe teilweise in Gasphase S, zugegebene Cl-Anteil größtenteils in Gasphase

### Untersuchung der Aschephasen

Zur Untersuchung der stattfindenden Umwandlungsprozesse, die bei der thermochemischen Behandlung von Klärschlammaschen ablaufen, wurden unbehandelte und bei unterschiedlichen Temperaturen behandelte Aschen mittels Röntgenpulverdiffraktometrie (XRD) analysiert. Der Temperaturbereich (350-1050°C) wurde in Schritten von 50°C bzw. 100°C variiert und es wurde MgCl<sub>2</sub> (15 mass.-%Cl in Asche) bei einer Verweilzeit von 60 min eingesetzt. Das Diffraktogramm zeigte, dass alle Proben überwiegend aus kristalliner Phase bestanden. Lediglich in der Rohasche war eine röntgenamorphe Komponente nachweisbar, die jedoch eine untergeordnete Bedeutung hat. In Abbildung 14 sind die Phasen der Rohasche und der produzierten Aschen ersichtlich.

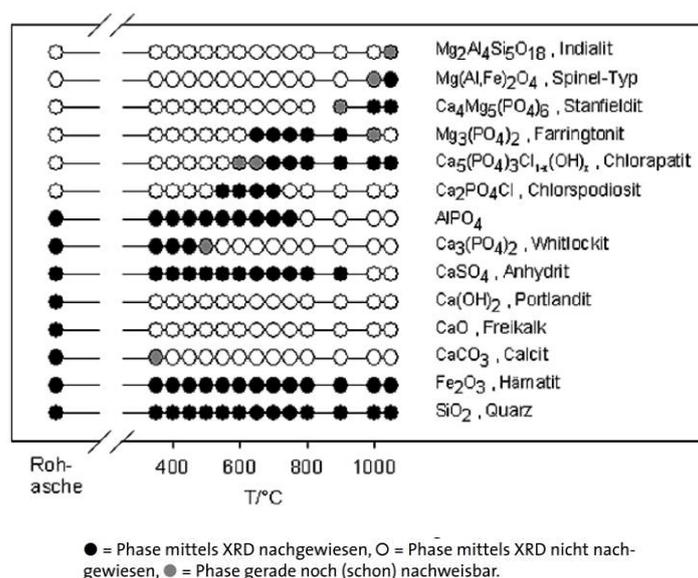


Abbildung 14: XRD-Ergebnisse, ausgewählte Mischphasen bei Temperaturen von 350-1050°C, Donator: MgCl<sub>2</sub>, Verweilzeit: 60 min<sup>2</sup>

Die Rohasche enthielt die P-haltige mineralischen Phasen Whitlockit und AlPO<sub>4</sub>. Nach der Behandlung bei

<sup>1</sup> vgl. ADAM u. a. 2008, S. 56ff

<sup>2</sup> ADAM u. a. 2008, S. 60

1000°C waren diese Phasen nicht mehr vorzufinden und die P-haltigen Phasen waren Chlorapatit, Stanfieldit und Farringtonit. Diese Ergebnisse zeigen, dass die thermochemische Behandlung von einer Abfolge chemischer Reaktionen begleitet wird. Mit Ausnahme von Quarz und Hämatit werden alle betrachteten kristallinen, mineralischen Phasen sowie die röntgenamorphen Komponenten der Rohasche unter den gewählten Behandlungsbedingungen umkristallisiert bzw. abgebaut. Aufgrund dieser Umwandlungsprozesse erklärt sich die hohe Effektivität des thermochemischen Verfahrens bezüglich der Schwermetallentfrachtung. Der Chlordonator reagierte innerhalb des Temperaturbereichs 550-700°C mit dem Whitlockit zu der intermediären Verbindung Chlorspodiosit. Eine weitere intermediäre Verbindung ist das Farringtonit (Magnesiumphosphat). Dagegen waren das Chlorapatit sowie das Stanfieldit bis zu 1050°C stabil. Aus dem Aluminiumphosphat bildeten sich Al-, Mg-haltigen Verbindungen Indialit bzw. Cordierit und Spinel-Typ. Diese Analysenergebnisse bestätigen die Beschreibung in Kapitel 2.2, dass der Phosphor nicht als reines P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in realen Proben vorliegt.

### **TU Wien und ASH DEC Umwelt AG**

Weitere Versuche zum Thema Schwermetallentfrachtung wurden von der TU Wien und der ehemals ASH DEC Umwelt AG durchgeführt. Hierbei wurde eine Entfrachtung der Schwermetalle aus Aschepellets (Ø3,25mm, WG >10 mass.-% aufgrund der Pelletierung mit Wasser) durch das AshDec Verfahren mittels CaCl<sub>2</sub> und variierenden Betriebsbedingungen durchgeführt. Es wurde der Einfluss der Temperatur (950-1050°C), die Verweilzeit (10-45 min), die Chlorkonzentration (12 und 17 mass.-% Cl in Asche) und die Gasgeschwindigkeit auf die Schwermetallanreicherung untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass höhere Temperaturen, höhere Chlorgehalte, längere Verweilzeiten und höhere Gasgeschwindigkeiten eine höhere Schwermetallanreicherung zur Folge haben. Bei der Verwendung von Aschepellets kann es dazu kommen, dass Schwermetalle in Richtung des Pelletkerns diffundieren und somit die Entfrachtung behindert wird.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> vgl. NOWAK u. a. 2010, S. 324ff

### 3 Zusammenfassung des Literaturteils

Phosphor ist im kommunalen Abwasser vorwiegend im Klärschlamm gebunden. Der Klärschlamm verursacht aber aufgrund der variierenden Zusammensetzung einige Problematiken hinsichtlich der Entsorgung bzw. Deponierung. Aufgrund der hohen Verfügbarkeit von Klärschlamm und einem relativ hohen Anteil an Nährstoffen wie Phosphor, Kalium, Magnesium, etc. ist ein Recycling des Klärschlammes sinnvoll. Bei der Verwendung und Verwertung von Klärschlamm sind jedoch verschiedene gesetzliche Bestimmungen in Bezug auf Elementkonzentrationen, vor allem von Schwermetallen, einzuhalten.

Bei der thermischen Verwertung von Klärschlamm werden verschiedene Prozesse bzw. Prozessführungen angewandt, hierbei hat sich hinsichtlich der Klärschlammveraschung zur darauffolgenden Phosphorrückgewinnung die thermische Monoverbrennung, -vergasung in einer Wirbelschicht herauskristallisiert. Dies resultiert daraus, dass keine Fremdkontamination durch zusätzliche aschereiche Brennstoffe stattfindet. Die Monoverbrennung wird derzeit in großtechnischen Anlagen eingesetzt. Die Monovergasung wird noch in einigen großtechnischen Anlagen erprobt. Bei der Monovergasung kann weiters ein energetisch nutzbares Produktgas zur effizienteren Klärschlammverwertung erzeugt werden, wobei sich das Konzept der Zweibett-Wirbelschicht-Dampfvergasung an der 100kWth Anlage der TU Wien als vielversprechendes Verfahrenskonzept erwiesen hat. Der derzeitige Stand der Technik zur Klärschlammverwertung in Zementwerken ist die Mitverbrennung im Drehrohrofen, um konventionelle Energieträger einzusparen und zusätzlich eine Klärschlamm Entsorgung zu erreichen. Problematisch ist hierbei jedoch die dauerhafte Einbindung von Phosphor in den Zement. Um den Phosphor einer Kreislaufnutzung zuzuführen muss dieser somit aus dem Klärschlamm zurückgewonnen werden.

Von den verschiedensten Phosphorrückgewinnungsverfahren weisen diejenigen aus der Klärschlammmasche das größte Potential auf. Hierbei wird der RecoPhos Prozess und das AshDec Verfahren betrachtet. Beim RecoPhos Prozess wird durch eine induktiv herbeigeführte carbo-thermische Reduktion von Klärschlammmasche gasförmiger Phosphor hergestellt. Dieser wird in darauffolgenden Schritten entweder zu elementarem Phosphor oder Phosphorsäure verarbeitet. Beim AsDec Verfahren werden ungewollte Begleitelemente, vorwiegend Schwermetalle, durch die thermische Verwertung im Drehrohrofen unter Zugabe von (chlorhaltigen) Additiven aus der Klärschlammmasche entfernt. Durch diese Additive kann die thermisch behandelte Klärschlammmasche direkt als Dünger verwendet werden. Der rückgewonnene Phosphor wird durch die Verwendung in der Landwirtschaft als Dünger in einer effizienten Art und Weise für die Kreislaufnutzung eingesetzt. Hierzu müssen jedoch die gesetzlichen Bestimmungen hinsichtlich der organischen Verunreinigungen sowie der Schwermetallkonzentrationen und der Löslichkeit eingehalten werden. Weiters sind düngemittelspezifische Mindestgehalte an  $P_2O_5$  (rechnerisch aus der Phosphorkonzentration ermittelt) einzuhalten.

Bei Versuchen der TU Wien und der ASH DEC Umwelt AG wurden Versuche mit 12 und 17 mass.-%<sub>Cl in Asche</sub> durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass höhere Temperaturen, höhere Chlorgehalte, längere Verweilzeiten und höhere Gasgeschwindigkeiten eine höhere Schwermetallabreicherung zur Folge haben. Im Zuge des EU Projektes SUSAN wurde eine Chlorkonzentration von 5-10 mass.-%<sub>Cl in Asche</sub> als günstig identifiziert, da eine weitere Steigerung der Chloridkonzentration in der Asche kaum eine wesentliche Absenkung der Schwermetallgehalte bewirkte. In Abhängigkeit der Versuchstemperaturen und Chlorkonzentrationen kristallisieren unterschiedliche mineralische Aschephase aus. Die bei der Versuchsreihe zu erwartenden Phasen sind Apatit (Chlorapatit), Farringtonit, Stanfieldit, Hämatit und Quarz. Aufgrund des temperaturabhängigen (Um)kristallisationsverhaltens erklärt sich die hohe Effektivität des AshDec Verfahrens bezüglich der Schwermetallentfrachtung.

Bei der Auswertung der Analysenergebnisse ist bei einem Vergleich mit Literaturergebnissen darauf zu achten, dass die Bindungsformen des Phosphors nur rechnerisch als Oxide angegeben werden und somit nicht der realen Zusammensetzung des Klärschlammes entspricht.

Die Förderbarkeit des Klärschlammes spielt bei den Versuchen in einer stationären Wirbelschichtanlage im Labormaßstab eine wichtige Rolle, da eine möglichst störungsfreie, kontinuierliche Einbringung anzustreben ist. Der Wassergehalt nimmt neben dem erheblichen Einfluss auf den Heizwert auch Einfluss auf die Förderbarkeit des Klärschlammes. Folglich sollte eine künstliche Schlamm-trocknung für das Edukt der Versuchsreihe sowie eine Pelletierung bzw. Granulierung des Klärschlammes vorgenommen werden.

Resultierend aus der Literaturrecherche der thermischen Behandlung von Klärschlamm und der Phosphorrückgewinnungsverfahren wird für die folgende Versuchsreihe eine thermische Monovebrennung, -vergasung von Klärschlamm durchgeführt, um die Klärschlamm-asche für eine drauffolgende Phosphorrückgewinnung zu konditionieren (ev. für den RecoPhos Prozess). Da der Phosphor in Form von Dünger einer Kreislaufnutzung zugeführt wird, wird das AshDec Verfahren aufgrund der direkten Verwendung des phosphorreichen Düngers in der stationären Wirbelschichtanlage untersucht. Das hierzu verwendete Additiv CaCl<sub>2</sub> wird mit einer Konzentration von 12 mass.-%<sub>Cl in Asche</sub> zudosiert und mit dem Klärschlamm pelletiert. Aufgrund der Zusammensetzung des Klärschlammes ist mit einem erhöhten Anteil an N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> und H<sub>2</sub>S sowie Teeren im Produktgas zu rechnen.

## 4 Prinzipien und Methoden für den experimentellen Versuchsaufbau der Klärschlammveraschung

Die aus der Literaturrecherche erhaltenen Erkenntnisse werden zur Planung des Versuchsaufbaus herangezogen. Dazu werden in diesem Kapitel die verwendeten Brennstoffe beschrieben, sicherheitsrelevante Aspekte erläutert und auf die getroffenen Sicherheitsvorkehrungen eingegangen. Zur Veranschaulichung der durchgeführten Versuche wurde eine Versuchsmatrix erstellt. Weiters werden der Versuchsaufbau durch einen Überblick der gesamten Anlage mittels Fließbild sowie die verwendeten Prozessregelungssysteme und Messgeräte dargestellt. Da für die eingesetzten Analysemethoden eine spezifische Probenaufbereitung notwendig ist, wird diese ebenfalls erklärt.

### 4.1 Beschreibung der eingesetzten Brennstoffe

Bezeichnung: Klärschlammgranulat, Durchmesser 4mm<sup>1</sup>

Für die Versuchsreihe soll Klärschlamm in der stationären Wirbelschichtlaboranlage verbrannt und vergast werden. Der eingesetzte Klärschlamm wurde als rieselfähiges kugelförmiges Granulat mit einem durchschnittlichen Durchmesser von 4 mm angeliefert. Die einzelnen Granulatkugeln waren ausreichend hart und blieben trotz des Versuches diese zu zerdrücken formstabil.



Abbildung 15: Klärschlammgranulat

Es konnte jedoch ein transportbedingter feiner Abrieb festgestellt werden, der beim Öffnen des Transportbehältnisses in Form von schwebenden Feinpartikeln austrat. Sobald eine Probe mittels Probenschaufel entnommen wurde, stieg diese Staubbelastung an. Der verwendete Klärschlamm wurde in einem Faulturm hygienisiert und anschließend in einen Konvektionstrommeltrockner eingebracht. Die Lufteintrittstemperatur beträgt ca. 500°C und die Luftaustrittstemperatur ca. 80°C. Anschließend wurde der getrocknete Klärschlamm granuliert. Da keine genaueren Daten über die Aufbereitung des Klärschlammes zu Klärschlammgranulat vorliegen wird davon ausgegangen, dass die für unbehandelten Klärschlamm vorherrschenden Sicherheitsrisiken ebenfalls für das behandelte Klärschlammgranulat gelten. Diese

<sup>1</sup> vgl. MISLEJ, BABIC, MLAKAR & KALCIC o. J.

Einstufung erfolgte aufgrund der Tatsache, dass nicht bekannt ist ob eine ausreichende Kerntemperatur im Granulat erreicht wurde, um alle biologischen Gefahren, mit Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit, ausschließen zu können. Die Ergebnisse der vollumfänglichen Brennstoffanalyse des Klärschlammgranulats sind in Tabelle 21 und Tabelle 22 vorzufinden. Das Klärschlammgranulat wurde für die Versuche 1 bis 8 eingesetzt.

Tabelle 21: Ergebnisse der vollumfänglichen Brennstoffanalyse von Klärschlammgranulat

Parameter	Einheit	Klärschlammgranulat, TS	Einheit	Klärschlammgranulat, roh
Brennwert (DIN 51900 T2)	kJ/kg <sub>tr</sub>	16261	kJ/kg	14621
Heizwert		15272		13487
Wassergehalt (DIN 51718)	mass.-% <sub>tr</sub>	-	mass.-%	10,08
Aschegehalt (EN ISO 18122)		31,50		28,33
C*		38,17		34,32
H*		4,50		4,04
N*		6,37		5,73
S*		1,097		0,986
Cl*		0,115		0,103
Anteil flüchtige Bestandteile (EN ISO 18123)		61,03		54,88
Anteil flüchtige Bestandteile, aschefrei	mass.-% <sub>tr,af</sub>	89,09	mass.-% <sub>af</sub>	76,57

\* Messmethode nicht im akkreditiertem Prüfumfang

Der Wassergehalt des Klärschlammgranulats ist sehr gering und bestätigt anhand der Betrachtung von Abbildung 2 die Information über eine künstliche Schlamm Trocknung. Der Aschegehalt ist geringer und der Kohlenstoff- und Wasserstoffgehalt höher als im Vergleich zu den Gehältern des Klärschlammes aus Tabelle 11. Aufgrund des höheren Kohlenstoff- und Wasserstoffgehaltes ist auch der Anteil an flüchtigen Bestandteilen höher. Weiters ist auch noch festzuhalten, dass der Stickstoffgehalt größer ist. Daher ist mit einem noch größeren Anteil an produziertem NH<sub>3</sub> zu rechnen (siehe Tabelle 14). Das Ascheschmelzverhalten des Klärschlammgranulats ist in Tabelle 22 ersichtlich.

Tabelle 22: Ascheschmelzverhalten nach CEN/TS 15370-1

Parameter	Einheit	Klärschlammgranulat
Erweichungstemperatur A	°C	1160
Sphärischtemperatur B	°C	1210
Halbkugeltemperatur C	°C	1270
Fließtemperatur D	°C	1300

Das Ascheschmelzverhalten der Klärschlämme aus Tabelle 22 und den Versuchen an der TU Wien 2012 laut Tabelle 10 sind annähernd gleich. Die Erweichungstemperatur liegt oberhalb der ausgewählten Prozesstemperaturen der Versuchsreihe (siehe Tabelle 28) und somit werden keine Probleme aufgrund des Ascheschmelzverhaltens erwartet.

Bezeichnung: Klärschlamm pellets, Länge 1-4 cm, Durchmesser 4 mm

Für die Herstellung der Klärschlamm pellets wurde das Klärschlamm granulat mit pulverförmigem  $\text{CaCl}_2$  vermengt und das Gemenge in einen Pelletierer eingebracht. Die zugeführte Menge an  $\text{CaCl}_2$  wurde so berechnet, dass ein theoretischer Gehalt von ca. 12 mass.-% $_{\text{Cl}}$  in Asche erreicht wird. Dieser Gehalt wurde aufgrund der Versuchsergebnisse des EU-Projektes SUSAN und den Versuchen der TU Wien aus Kapitel 2.7.2 gewählt. Das Ergebnis aus Tabelle 23 zeigt jedoch, dass der Anteil an Cl in der Asche mit ca. 9,7 mass.-% geringer ist. Dies resultiert durch die inhomogene Zudosierung (händisch) des  $\text{CaCl}_2$  während der Pelletierung bzw. durch eventuelle Verflüchtigung des Cl aufgrund der Erwärmung bei der Pelletierung. Die Klärschlamm pellets hatten einen Durchmesser von 4 mm (bedingt durch die Pelletiermatrize) und eine Länge zwischen 1-4 cm. Durch den Transport mittels Förderschnecke wurden die Pellets auf dem Weg vom Bunker zum Wirbelschichtreaktor gekürzt, sodass diese eine durchschnittliche Länge von 1-2 cm hatten. Der Durchmesser blieb unverändert. Durch diese Zerkleinerung in der Förderschnecke kam es zu einem erhöhten Aufkommen von Staub.



Abbildung 16: Klärschlamm pellets (links); zerkleinerte Pellets nach erfolgter Schneckenförderung (rechts)

Die Einstufung der vorherrschenden Gefahren erfolgte für die Klärschlamm pellets analog zur Einstufung des Klärschlamm granulats. Die Ergebnisse der vollumfänglichen Brennstoffanalyse der Klärschlamm pellets sind in Tabelle 23 und Tabelle 24 vorzufinden. Die Klärschlamm pellets wurden für die Versuche 9 bis 16 eingesetzt.

Tabelle 23: Ergebnisse der vollumfänglichen Brennstoffanalyse von Klärschlamm pellets

Parameter	Einheit	Klärschlamm pellets, TS	Einheit	Klärschlamm pellets, roh
Brennwert (DIN 51900 T2)	kJ/kg <sub>tr</sub>	15125	kJ/kg	14048
Heizwert		14099		12921
Wassergehalt (DIN 51718)	mass.-% <sub>tr</sub>	-	mass.-%	7,12
Aschegehalt (EN ISO 18122)		32,13		29,85
C*		35,05		32,56
H*		4,67		4,34
N*		5,79		5,38
S*		0,979		0,909
Cl*	3,135	2,911		
Anteil Cl in Asche	mass.-% <sub>Cl in Asche</sub>	9,76	mass.-% <sub>Cl in Asche</sub>	9,75
Anteil flüchtige Bestandteile (EN ISO 18123)	mass.-% <sub>tr</sub>	56,51	mass.-%	52,49
Anteil flüchtige Bestandteile, aschefrei	mass.-% <sub>tr,af</sub>	83,26	mass.-% <sub>af</sub>	74,82
* Messmethode nicht im akkreditiertem Prüfumfang				

Der Wassergehalt der Klärschlamm pellets ist geringer als beim Klärschlamm granulat. Eine mögliche Ursache ist die Erwärmung während der Pelletierung und die resultierende Verflüchtigung des Wassers. Der Asche-, Kohlenstoff-, Stickstoff- und Schwefelgehalt ist in derselben Größenordnung wie beim Klärschlamm granulat. Der Chlorgehalt ist aufgrund der Zudosierung durch CaCl<sub>2</sub> höher. Das Ascheschmelzverhalten des Klärschlamm granulates ist in Tabelle 24 ersichtlich.

Tabelle 24: Ascheschmelzverhalten nach CEN/TS 15370-1

Parameter	Einheit	Klärschlamm pellets
Erweichungstemperatur A	°C	1170
Sphärischtemperatur B	°C	n.a.
Halbkugeltemperatur C	°C	1230
Fließtemperatur D	°C	1320
n.a. nicht aufgetreten		

Das Ascheschmelzverhalten der Klärschlamm aus Tabelle 24 und Tabelle 22 sind annähernd gleich. Die Erweichungstemperatur liegt oberhalb der ausgewählten Prozesstemperaturen der Versuchsreihe (siehe Tabelle 28) und somit werden ebenfalls keine Probleme aufgrund des Ascheschmelzverhaltens erwartet.

## 4.2 Sicherheitsrelevante Aspekte

Vor Versuchsbeginn mussten einige sicherheitsrelevante Aspekte beachtet werden. Für den Umgang und die Pelletierung des Klärschlammes wurde die notwendige Schutzausrüstung ausgewählt. Um die Anlagensicherheit während dem Versuch zu gewährleisten wurden Betrachtungen im Hinblick auf entstehende Risiken durchgeführt. Es konnten Verletzungsrisiken durch elektrisch geführte Bauteile (vorwiegend Anschlussstellen der Heizschalen) sowie durch heiße Oberflächen identifiziert werden. Weiters konnte bei den Vergasungsversuchen ein Risiko bei der Gewährleistung der Anlagensicherheit, aufgrund der Entstehung von potenziell explosionsfähigen Gasen festgestellt werden. In der nachfolgenden Tabelle sind die Zündtemperaturen von ausgewählten technischen Gasen angeführt.

Tabelle 25: Zündtemperaturen von ausgewählten technischen Gasen<sup>1</sup>

Bezeichnung	Einheit	Ammoniak	Ethan	Ethen	Kohlenmonoxid	Methan	Wasserstoff
<b>Chemische Formel</b>	-	NH <sub>3</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>
<b>Dichteverhältnis (Luft = 1)</b>	-	0,59	1,047	1,00	0,97	0,55	0,07
<b>Zündbereich in Luft</b>	vol.-%	15,0 – 28,0	3,0 – 12,5	2,7 – 34,0	12,5 – 74,0	5,0 – 15,0	4,0 – 76,0
<b>Zündtemperatur in Luft</b>	°C	630	510	425	605	595	585

Die Gase H<sub>2</sub>, CO und CH<sub>4</sub> wurden für die Versuche vorwiegend als sicherheitsrelevante Gase eingestuft, da erhöhte Konzentrationen innerhalb des Explosionsbereiches erwartet wurden. Der Bereich der Abzugshaube wurde als kritischer Bereich identifiziert, da dort aufgrund von Sauerstoffeintrag potenziell eine explosionsfähige Atmosphäre gebildet werden kann. Folglich wurde das Abgas beim Eintritt in die Abzugshaube mit N<sub>2</sub> überlagert.

Aus sicherheitsrelevanten Aspekten wird noch der Temperatursensor T8 erwähnt, da dieser direkt beim Eintritt des Abgases in die Abzugshaube angebracht wurde (siehe Abbildung 23). Das Messergebnis dieses Messensors wurde mit den Zündtemperaturen der vorliegenden Gase verglichen. Da die Abgaszusammensetzung durch die Verdünnung außerhalb des Explosionsbereiches der einzelnen Gase lag **und** die Zündtemperaturen bei weitem nicht erreicht wurden (siehe Tabelle 25), sind die getroffenen sicherheitsrelevanten Maßnahmen als ausreichend eingestuft worden. Die Verdünnung des Abgases mittels N<sub>2</sub> ist nur bei den Vergasungsversuchen eingesetzt worden.

<sup>1</sup> vgl. <https://www.science-at-home.de/>. (gelesen am: 25.08.2019)

## 4.2.1 Auswahl und Verwendung der notwendigen Sicherheitsausrüstung

Aufgrund der Risiken, die bei der Pelletierung des Klärschlammes entstehen (Inkorporation von Bakterien, Viren belasteten Stäuben bzw. durch Haut-, Schleimhautkontakt) wurde die Schutzausrüstung sorgfältig ausgewählt. Für die Einschätzung der Risiken wurde das firmeninterne Sicherheitsdatenblatt zu Klärschlamm der Fa. Schwenk herangezogen. Dieses Datenblatt ist auf frischen Klärschlamm referenziert, jedoch wurden die Risiken des thermisch behandelten Klärschlammgranulats als gleichwertig eingestuft. Die verwendete Schutzausrüstung ist in Tabelle 26 ersichtlich.

Tabelle 26: Eingesetzte Schutzausrüstung

Art der Schutzausrüstung	Bezeichnung
Augen-, Atemschutz	Sundström Vollmaske SR200
Filter	Gasfilter SR217 A1
	Partikelfilter SR510 P3 R
	Vorfilter
Körperschutz	Einweganzkörperanzug
Handschutz	Chemikalienschutzhandschuhe Kategorie 3

Die Auswahl und Beschreibung des Atemschutzgerätes sowie der Filtertypen erfolgte durch ein Datenblatt der Firma Dräger (siehe Anhang). Laut Datenblatt sind Partikelfilter der Type P3 sowie eine Vollmaske für die vorliegenden Gesundheitsrisiken ausreichend. Die Vollmaske wurde zum Schutz des Gesichtes und der Augen vor Bakterien, Viren belastetem Staub sowie dem pulverförmigen  $\text{CaCl}_2$  (verursacht schwere Augenreizungen) ausgewählt. Bei der Pelletierung wurde jedoch ein stechender Geruch wahrgenommen, deshalb wurde für die weitere Hantierung ein Gasfilter der Type SR217 A1 für organische Gase eingesetzt. Als erstes wird der Gasfilter an der Maske montiert, anschließend der Partikelfilter und schlussendlich der Vorfilter. Somit wird verhindert, dass der Gasfilter durch Partikel frühzeitig verstopft wird. Nach durchgeführter Arbeit und Reinigungstätigkeiten wurden die Chemikalienschutzhandschuhe und der Einweganzkörperanzug unmittelbar außerhalb des gereinigten Arbeitsbereiches ausgezogen und mit den Filtern dementsprechend entsorgt. Die Arbeitsschuhe wurden intensiv gereinigt und die notwendige Körperreinigung, -pflege durchgeführt.

Nach Gebrauch der Vollmaske musste diese noch sorgfältig gereinigt und desinfiziert werden, um die Übertragung von Bakterien, -sporen und Viren auf andere Maskennutzer zu verhindern.



Abbildung 17: Einzelteile der Vollmaske sowie verwendetes Desinfektionsmittel



Abbildung 18: Desinfektion der Maske und Maskenteile

Die Vollmaske wurde behutsam auseinandergenommen, wobei die Bänderung, der Ansaugstutzen mit Aufsteckkappe und die Ventilteller demontieren und mittels Wasser vorgereinigt wurden. Die Einzelteile der Vollmaske sowie das verwendete Desinfektionsmittel sind in Abbildung 17 ersichtlich. Aufgrund der Verfügbarkeit erfolgte die Vorreinigung mit lauwarmem Leitungswasser. Anschließend wurde die Aufbewahrungsbox bis zur Markierung mit destilliertem Wasser befüllen und das Maskendesinfektionsmittel EW80@des der Firma „Atenschutztechnik Menzl GmbH“ zudosiert (0,5 vol.- % bzw. bei 8 l Boxenvolumen ca. 40 ml). Nach einlegen der Maskenteile wurde die Vollmaske leicht geschwenkt, damit das Desinfektionsmittel durch alle Öffnungen hindurchströmen kann. Es wurde darauf geachtet, dass alle Maskenteile während der Desinfektion vollständig bedeckt waren (siehe Abbildung 18). Die Desinfektionszeit dauerte 12 min anschließend wurden alle Maskenteile gründlich mit destilliertem Wasser abgespült. Das in der Maske stehen gebliebene Restwasser wurde mit einem reinen Tuch trockengetupft. Die Entfernung der Restfeuchte erfolgte durch Lufttrocknung.

Beim Zusammenbau ist auf einen ordnungsgemäßen Sitz der Ventilteller sowie aller Ansteckteile zu achten. Die Bänderung ist vorsichtig anzubringen und der Ansaugstutzen sollte handfest angezogen werden. Ersatzteile der Vollmaske sind beim Hersteller bzw. beim Vertriebspartner nachzubestellen.

### 4.3 Versuchsaufbau

Für die Veraschung des Klärschlammgranulats und der Klärschlammpellets wurde eine Versuchsreihe mit 16 Versuchen an einer stationären Wirbelschichtanlage im Labormaßstab im Technikum der TU Wien durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung der stationären Wirbelschichtapparatur im Labormaßstab ist in der fachspezifischen Literatur vorzufinden.<sup>1,2</sup>

Bei den Versuchen wurden die Prozessparameter Betttemperatur, Bettmaterial, Luftzahl und Additive variiert. Diese Variation der Prozessparameter ist in Tabelle 27 ersichtlich.

Tabelle 27: Variation der Prozessparameter

Varierte Prozessparameter	Betttemperatur	Bettmaterial	Luftzahl	Additive
Einheit	°C	-	-	-
Variation	750 - 950	Quarzsand – Kalkstein	<1, >1	Ohne –mit CaCl <sub>2</sub>

Die Korngröße des benötigten Bettmaterials musste vor Versuchsbeginn an die Versuchsbedingungen angepasst werden. Die Erreichung der Versuchstemperatur erfolgte durch Beheizung mit Heizschalen und durch die thermische Umwandlung des Brennstoffes. Die Einstellung der unter-, überstöchiometrischen Umwandlung erfolgte durch Variation des Brennstoffzustroms bei konstantem Luftvolumenstrom. Der Luftvolumenstrom wurde konstant gehalten, um möglichst einheitliche Strömungszustände zu schaffen. Es wurde eine blasenbildende Wirbelschicht eingestellt (siehe Kapitel 6.3).



Abbildung 19: Kalkstein



Abbildung 20: Quarzsand

Die in Tabelle 28 ersichtliche Versuchsmatrix resultiert aus der Variation der Prozessparameter. Es wurden insgesamt 16 Versuche durchgeführt. Bei den Versuchen der Nummern 1-8 wurde als Brennstoff das Klärschlammgranulat verwendet. Die Versuche der Nummern 9-16 wurden mit den Klärschlammpellets durchgeführt. Die Farbe der Tabellenzeilen der einzelnen Versuche, ist analog zu den Darstellungen der Versuchsergebnisse in den Diagrammen des Kapitels 6 und des Anhangs.

<sup>1</sup> EBLETZBICHLER 2017

<sup>2</sup> PRIBYL, SCHMID & MÜLLER 2018

Tabelle 28: Versuchsmatrix

Versuchsnummer	Bettmaterial	d <sub>sv</sub>	Temperatur	Additive	Luftzahl	Art der thermischen Behandlung
<b>Einheit</b>	-	µm	°C	-	-	-
<b>1</b>	Quarz	299	750	ohne	>1	Verbrennung
<b>2</b>			950			
<b>3</b>	CaCO <sub>3</sub>	380	750			
<b>4</b>			950			
<b>5</b>	Quarz	299	750	ohne	<1	Vergasung
<b>6</b>			950			
<b>7</b>	CaCO <sub>3</sub>	380	750			
<b>8</b>			950			
<b>9</b>	Quarz	299	750	CaCl <sub>2</sub>	>1	Verbrennung
<b>10</b>			950			
<b>11</b>	CaCO <sub>3</sub>	380	750			
<b>12</b>			950			
<b>13</b>	Quarz	299	750	CaCl <sub>2</sub>	<1	Vergasung
<b>14</b>			950			
<b>15</b>	CaCO <sub>3</sub>	380	750			
<b>16</b>			950			

### 4.3.1 Überblick der gesamten Versuchsanlage

Die Versuchsreihe wurde an einer stationären Wirbelschichtanlage mit integrierter online Gasmessung durchgeführt. Die verwendete Wirbelschichtapparatur wurde für die Versuchsreihe modifiziert und die Gasmessstrecke durch Integration zweier Waschflaschen erweitert. Die Waschflaschen dienen zur Teerabscheidung und somit zum Schutz des Gasanalysators. Beide Waschflaschen wurden mittels Kryostaten gekühlt. In Abbildung 21 ist die Reaktoreinheit der Wirbelschichtapparatur und in Abbildung 22 der Steuerstand zur Gasmischung ersichtlich. Ein Fließbild der stationären Wirbelschichtapparatur ist in Abbildung 23 dargestellt. In diesem Fließbild sind die Gasleitungen mit Ventilen, der schematische Aufbau der Reaktoreinheit, die Messstellen und Messausrüstung sowie die Bezeichnung wichtiger Anlagenbereiche und -komponenten eingezeichnet.

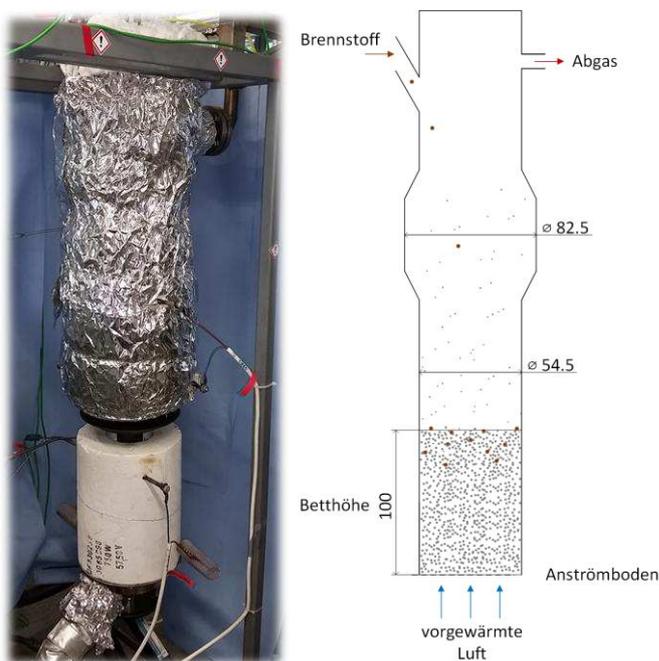


Abbildung 21: Laborapparatur stationäre Wirbelschicht (links),  
Schema Laborapparatur (rechts)<sup>1</sup>



Abbildung 22: Steuerstand  
Gaszufuhr

Die im Fließbild dargestellte Färbung der Gasleitungen ist analog zur Färbung der verbauten Gasleitungen am Steuerstand bzw. der Wirbelschichtapparatur. Für die Durchführung der gesamten Versuchsreihe wurden lediglich die beiden Stickstoffstränge sowie der Druckluftstrang benötigt.

<sup>1</sup> BENEDIKT u. a. 2018

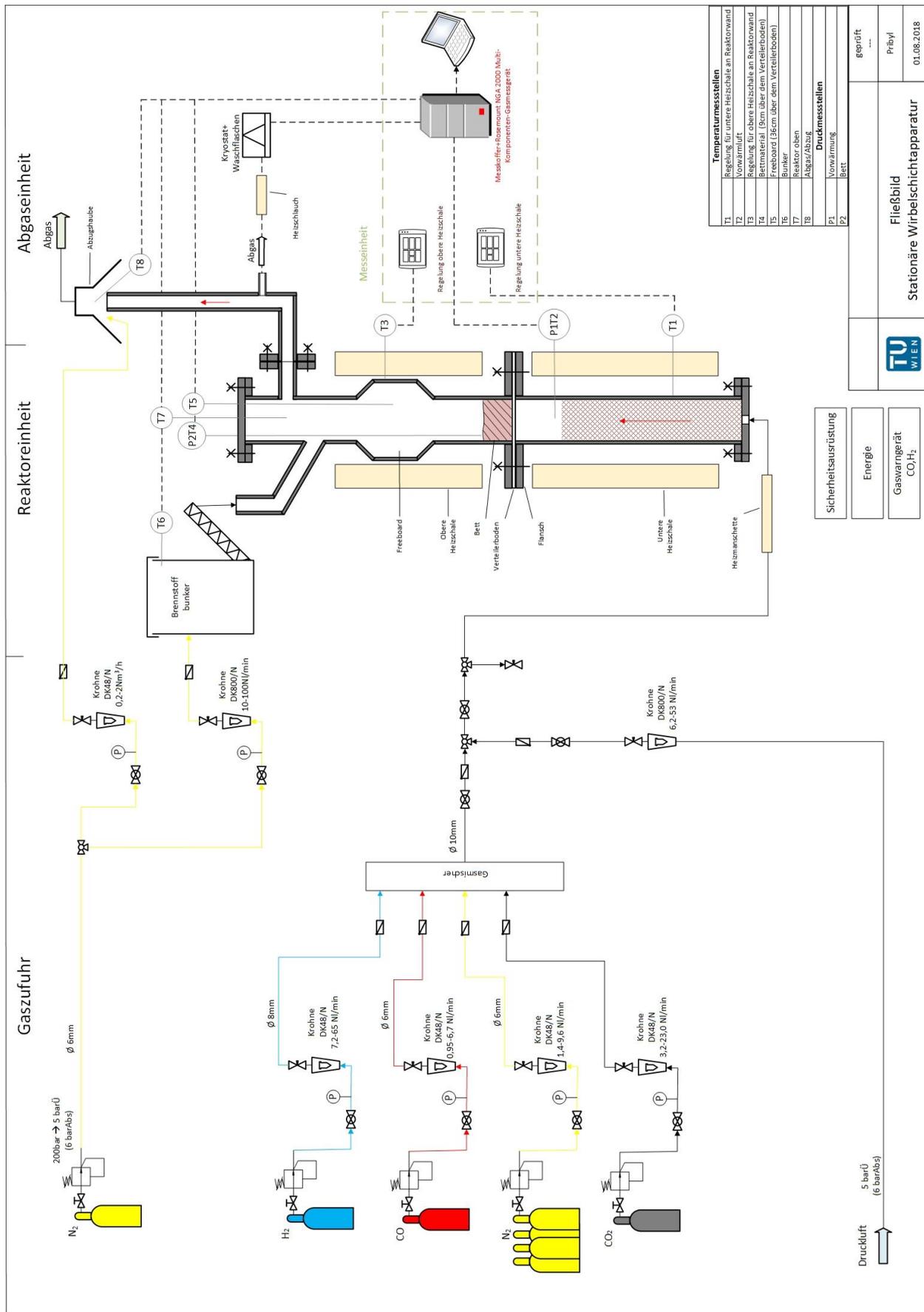


Abbildung 23: Fließbild der stationären Wirbelschichtapparatur

### 4.3.2 Versuchsdurchführung

Für die Versuchsdurchführung wurde eigens eine Checkliste erstellt, um die Versuchsvorbereitungen zu beschleunigen und chronologische sicherheitsrelevante Arbeitsschritte vor, während und nach dem Versuch einzuhalten. Die Checkliste ist dem spezifischen Versuchsprotokoll zu entnehmen.<sup>1</sup>

Nach Durchführung der notwendigen Vorbereitungen wurde Bettmaterial in die Anlage eingebracht, die Luftzufuhr gestartet und die Anlage mit den Heizschalen vorgewärmt. Anschließend wurde die Brennstoffzufuhr aktiviert. Die Nachregelung der Heizschalen erfolgte solange, bis die gewünschte Versuchstemperatur erreicht war. Aufgrund der guten Anlagenisolierung konnten die Heizschalen nach Erreichen der Versuchstemperatur abgeschaltet werden. Beim Einsatz von Kalkstein als Bettmaterial wurde die Abschaltung der Heizschalen nach erfolgter Kalzinierung durchgeführt. Vor dem Start der Brennstoffzufuhr wurde die Stickstoffspülung für den Bunker und die Stickstoffüberlagerung in der Abzugshaube (nur bei Vergasungsversuchen) eingeschaltet. Aufgrund der in Kapitel 4.2 angeführten sicherheitsrelevanten Aspekte wird das Abgas beim Eintritt in die Abzugshaube mit Stickstoff überlagert, um somit eine Verdünnung außerhalb des Explosionsbereiches der vorliegenden Gase zu erreichen. Zusätzlich wurden die Messwerte des Temperatursensors T8 mit den Zündtemperaturen der vorliegenden Gase verglichen.

Die Brennstoffzufuhr blieb solange eingeschaltet bis eine, für die Analysen, ausreichende Menge an Asche vorlag (etwa 1-3 h konstante Betriebsbedingungen). Bei den Verbrennungsversuchen wurde nach Abschaltung der Brennstoffzufuhr mittels Luft auf Raumtemperatur gekühlt. Zur Kühlung wurde bei den Vergasungsversuchen die Luftzufuhr durch eine Stickstoffzufuhr ersetzt. Aufgrund der langen Kühldauer wurde der Stickstoff aus einem Rohrbündel entnommen. Die Steuerung der Stickstoffzufuhr erfolgte über den Steuerstand.

Nach erfolgter Abkühlung (über Nacht) wurde das Bettmaterial und die erzeugte Asche laut Checkliste entnommen, abgewogen, fotografisch dokumentiert und ordnungsgemäß verpackt. In weiterer Folge wurden die Proben für die Analysen vorbereitet.

Beispielhaft werden hier für einen Verbrennungs- und Vergasungsversuch die eingestellten Prozessdaten in Tabelle 29 angeführt. Der Luftvolumenstrom zur Einstellung des gewünschten Strömungszustandes (Abbildung 29) wurde bei den Verbrennungs-, Vergasungsversuchen konstant gehalten. Es wurde lediglich der Brennstoffmassenstrom je nach Art der thermischen Verwertung angepasst. Die eingestellten Prozessdaten der gesamten Versuchsreihe sind dem spezifischen Versuchsprotokoll zu entnehmen.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> THELEN 2018

Tabelle 29: Eingestellte Prozessparameter ausgewählter Versuche

Parameter	Einheit	Wert	
		Verbrennung	Vergasung
Versuchsart	-	Verbrennung	Vergasung
Versuchsnummer	-	2	6
Versuchsdatum	-	22.06.2018	03.07.2018
Bettmaterial	-	Quarzsand	Quarzsand
$\Phi$ -Spherizität	-	0,9	0,9
$d_{SV}$ -Sauter Durchmesser	$\mu\text{m}$	0,299	0,299
Masse eingebrachtes Bettmaterial	g	350	350
angestrebte Versuchstemperatur	$^{\circ}\text{C}$	950	950
Regelung obere Heizschale	$^{\circ}\text{C}$	850	865
Regelung untere Heizschale	$^{\circ}\text{C}$	800	740
Heizmanschette	$^{\circ}\text{C}$	200	210
Luftzahl	-	>1	<1
Druck Luft	bar	5	5
Volumenstrom Luft	NI/min	14	14
Druck Stickstoff	bar	5	5
Volumenstrom Stickstoff Bunker	NI/min	0,25	0,25
Volumenstrom Stickstoff Abzug	NI/min	0	13,33
Volumenstrom Stickstoff Steuerstand	NI/min	0	9,6
Volumenstrom Gaskühlerpumpe	keine Einheit an Pumpe ablesbar	0,7	0,7
Gaskühlertemperatur	$^{\circ}\text{C}$	5	5
Motorfrequenz	hz	10	30,06
Brennstoffmassenstrom	g/h	151,98	456,85
Start Brennstoffzufuhr	-	14:08	13:55
Ende Brennstoffzufuhr	-	16:50	15:55
Dauer der Brennstoffzufuhr	h	2,7	2
gesamte Eduktmasse	g	410,34	913,70
Probenentnahmedatum	-	25.06.2018	04.07.2018
Auswaage gesamt	g	403,81	465,6

### 4.3.3 Prozessregelungssysteme und Messgeräte

**Gasanalyse:** Für die Analyse der Abgaszusammensetzung wurde ein Rosemount NGA 2000 Multi-Komponenten-Gasmessgerät verwendet. Mit diesem Gasmessgerät konnten die Gase  $H_2$ ,  $CO$ ,  $O_2$  und  $CO_2$  gemessen werden. Prinzipiell ist dieses Messgerät auch für die Konzentrationsmessung von  $CH_4$  ausgestattet, zum Zeitpunkt der Versuchsreihe war dies aufgrund eines technischen Defektes nicht möglich. Sekundäre Komponenten wie  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_3H_8$  (vgl. Tabelle 14) wurden im Zuge der Versuchsreihen nicht analysiert.

Um das Gasmessgerät vor Zerstörung sowie Verschmutzung durch Partikel und Teere zu schützen wurde ein beheizter Filter, beheizter Schlauch sowie Waschflaschen befüllt mit Heizöl und Biodiesel (RME-Rapsmethylester) verwendet. Zur Kühlung der Waschflaschen wurde ein Kryostat eingesetzt. Als Kühlmittel diente eingefärbtes Glykol. Das Abgas wurde nach erfolgter Reinigung durch die Waschflaschen in einen weiteren Kühler eingebracht und anschließend dem Gasmessgerät mit einer Temperatur von  $5^\circ C$  zugeführt. Die genauen Einstellungen sind exemplarisch für 2 Versuche in Tabelle 29 ersichtlich.

#### Temperaturmessung und Prozessregelung:

Als Temperatursensoren wurden RS Pro Thermoelemente Typ K Fühler:  $-100^\circ C$  bis  $1100^\circ C$  mit Steckverbindung (m/w) verwendet. Die Messwerte wurden als Spannungssignal zum Messkoffer übertragen und mittels dem Computerprogramm LabView grafisch dargestellt. Die Datenspeicherung erfolgte in 5-10 s Schritten in eine Exceldatei.

Die Positionierung sowie die Bezeichnungen der Druck- und Temperaturmessstellen sind in Abbildung 23 ersichtlich. Bis auf die Temperatursensoren T1 und T3 sind alle Sensoren mit einem Messkoffer (mit eingebauten Druckmessdosen) verbunden. Die Temperatursensoren T1 und T3 messen die Temperatur an der Reaktoraußenseite und sind mit Reglern zur Regelung der jeweiligen Heizschale verbunden. Die Regelung der Heizschalen ist in Abbildung 24 ersichtlich.



Abbildung 24: Regelung der Heizschalen

Weiters wurde eine Heizmanschette inklusive Temperaturregler zur zusätzlichen Vorwärmung der einströmenden Luft verwendet.

#### 4.4 Aufbereitung der Brennstoffprobe

**Siebung:** Für die Trennung der produzierten Klärschlammaschen vom Bettmaterial wurden Siebe mit einer Maschenweite von 630  $\mu\text{m}$  verwendet. Der Siebrückstand, der größer als 630  $\mu\text{m}$  war, wurde als Bettasche ohne Verunreinigung durch Bettmaterial eingestuft. Für die weitere Analyse der Aschen wurde nur dieser Rückstand verwendet. Der Siebrückstand, der kleiner als 630  $\mu\text{m}$  war, wurde als Bettmaterial mit Verunreinigung durch Ascherückstände eingestuft. Eine weitere Abtrennung der Ascherückstände aus dem Bettmaterial wurde nicht durchgeführt, da dies einen sehr hohen Trennaufwand bedeutet hätte. In Abbildung 25 ist das Bettmaterial (Quarzsand-beige Färbung) mit der Verunreinigung durch Ascherückstände (graue Färbung) des Versuches 8 ersichtlich. Für die Analysen der Bettmaterialien wurde darauf geachtet, vorwiegend nur Bettmaterial einzusetzen. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass Ascherückstände die Analysenergebnisse des Bettmaterials verfälschen.



Abbildung 25: Gesiebtes Bettmaterial des Versuches 8 mit Ascherückständen

Verunreinigungen durch Grenzkorn der Siebe, Fremdeintrag sowie etwaige Anlagenkorrosion (Thermoelement, Reaktorinnenwand, Ablösung von Verzunderung etc.) können nicht ausgeschlossen werden, jedoch wurde Wert auf eine sorgfältige und saubere Arbeitsweise bei der Prozessführung, der Probenaufbewahrung und -vorbereitung gelegt.

**Mahlung:** Für die Analysen RFA, ICP-OES und Röntgenpulverdiffraktometrie (XRD) mussten die Proben gemahlen werden. Dafür wurden eine Schneid-, Schwing- und Kugelmühle getestet. Die Schwingmühle konnte das Klärschlammgranulat, 4 mm sowie das Bettmaterial Quarzsand nicht mahlen, da diese eine zu hohe Härte besitzen. Für die Mahlung wäre außerdem eine verhältnismäßig hohe Probenmenge erforderlich, da der Anlagenverlust sehr groß ist. Weiters ist die Reinigung der Mühle und des rauen Mahlkörpers sehr aufwendig. Die Schneidmühle war für alle Proben bis auf die Bettmaterialien Quarzsand und Kalkstein geeignet. Jedoch ist der Reinigungsaufwand analog zur Schwingmühle. Bei beiden getesteten Mühlen kam es während dem Betrieb zu einer Staubbelastung im unmittelbaren Arbeitsbereich. Aufgrund der geringen Einbringungsmenge an Proben, der nicht vorhandenen Staubbelastung, des äußerst geringen Anlagenverlustes und der verhältnismäßig einfachen Reinigung wurde die Kugelmühle für die Mahlung gewählt. Aufgrund der Reproduzierbarkeit erfolgte die Mahlung der gesamten Proben mit dieser Mühlenart. Es wurde eine

Kugelmühle Retsch MM400 verwendet. Dazu wurde ein 50 ml Mahlbehälter aus Stahl mit einer Innenauskleidung aus Wolframcarbid sowie eine Mahlkugel aus Wolframcarbid eingesetzt. Die Mahlkugel wurde in den Mahlbehälter eingebracht und mit Probe beaufschlagt, sodass die Mahlkugel vollständig bedeckt war. Beim Zusammenbau des Mahlbehälters musste darauf geachtet werden, dass die innenliegende Kunststoffdichtung exakt auf der Dichtfläche aufliegt. Andernfalls kommt es während der Mahlung zum Austreten der Probe. Für den Betrieb musste die Kugelmühle mit einem Gegengewicht bestückt werden. Je nach Mahlbehälter ist ein entsprechendes Gegengewicht zu verwenden. Für die Einstellung der Kugelmühle wurde eine Frequenz von 30 Hz und eine Mahldauer von 2 min gewählt. Dies lieferte eine ausreichende Zerkleinerung für die Analysen.



Abbildung 26: Mahlbehälter, -kugel und innenliegende Dichtung der verwendeten Kugelmühle

Zwischen jeder Probe erfolgte eine Reinigung mit destilliertem Wasser, ein Ausschleifen mit Flies, ein Ausschwemmen mit Aceton und anschließend eine Trocknung mittels Druckluft. Stark haftende Ablagerungen wurden mittels Ultraschallreinigung abgelöst. Falls der Mahlbehälter und die Mahlkugel nicht ausreichend trocken sind, kommt es nach der Mahlung zu stark haftenden Ablagerungen.

Der Stahlbehälter mit innenliegender Auskleidung aus Wolframcarbid zeigte gegenüber einem reinen Stahlbehälter ein leichteres Reinigungsverhalten. Weiters ist Wolfram nicht standardmäßig im Klärschlamm enthalten und somit kommt es beim Verschleiß nicht zu einer Verfälschung der Eisenkonzentration. Der Wolframeintrag erfolgt während der Mahlung, da die Mahlkugel ebenfalls aus Wolframcarbid besteht. Wolframcarbid besitzt weiters eine höhere Mohshärte (9,5) als Quarzsand (7) sowie Kalkstein (3) und ist somit gut für die Mahlung geeignet.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> vgl. <https://de.wikipedia.org/> (gelesen am: 21.08.2019)

<sup>2</sup> vgl. <https://www.reneshim.com/at/de/wissen/edelsteinlexikon> (gelesen am: 21.08.2019)

## 5 Eingesetzte Analytik hinsichtlich der Phosphorrückgewinnung und Schwermetallentfrachtung

Um die gesetzlichen Bestimmungen für die Verwendung des thermisch behandelten Klärschlammes zu erfüllen müssen elementspezifische Grenzwerte eingehalten werden. Die im Zuge der Versuchsreihe produzierten Aschen werden anschließend hinsichtlich relevanter Elemente analysiert. Hierzu wurden verschiedene Analysenmethoden herangezogen und die Ergebnisse verglichen. Die einzelnen Analysenmethoden sowie die dafür notwendige Probenaufbereitung werden ebenfalls erläutert.

### 5.1 RFA-Röntgenfluoreszenzanalyse

Bei der Röntgenfluoreszenzanalyse wird die Technik der Fluoreszenzspektroskopie auf Röntgenstrahlung angewendet. Die Materialprobe wird dabei entweder durch polychromatische Röntgenstrahlung, Gamma- oder Ionenstrahlung angeregt. Dabei werden kernnahe Elektronen von inneren Schalen des Atoms auf weiter außen gelegene gehoben. Dadurch können Elektronen aus höheren Energieniveaus zurückfallen. Die freiwerdende Energie wird in Form von elementspezifischer Fluoreszenzstrahlung (Sekundärstrahlung) abgegeben. Diese Fluoreszenzstrahlung kann von einem Strahlungsdetektor aufgenommen und mittels Datenbank ausgewertet werden. Die Röntgenfluoreszenzanalyse ermöglicht eine Identifizierung und Konzentrationsbestimmung aller Elemente ab Ordnungszahl  $Z = 9$  (Fluor) unabhängig von der Zusammensetzung der Verbindungen.<sup>1</sup> Für die Analysen wurde ein wellenlängendispersives Gerät mit Rhodiumstrahlungsquelle eingesetzt. Als Ergebnis wird ein Diagramm mit den unterschiedlich gemessenen Wellenlängen (Spektren) erzeugt. Aufgrund der Leistung des verwendeten RFA-Gerätes können nur Elemente bis Antimon (Sb) sinnvoll detektiert werden.

**Probenvorbereitung:** Nach erfolgter Mahlung wurde 4-5 g Probe mit 2-3 g eines Analysenwachses ( $C_{18}H_{36}O_2N_2$ ) vermengt und mittels Turbula Mischer sowie einer Mischkugel ca. 45 min lang homogenisiert. Anschließend wurde das Gemenge mit einer 19 t Presse zu einer Tablette mit einem Durchmesser von ca. 4 cm und einer Höhe von ca. 1 cm gepresst. Diese Tablette wurde der Analyse zugeführt.

Bei dieser Analysenmethode können Ergebnisse vieler Proben innerhalb eines kurzen Zeitraums erfolgen, da mehrere Probenplatten mittels Probenhalter in das Analysengerät eingebracht werden können und die Analyse vollautomatisch läuft. Für die Auswertung der Ergebnisse am spezifischen Auswertungsprogramm ist fachkundiges Personal notwendig. Die Summe der Konzentrationen der einzelnen Elemente ergibt bei dieser Analysenmethode annähernd 100 mass.-% ( $\pm 1$  mass.-%). Aufgrund von Zeitersparnis (und somit Kostenersparnis) müssen im Auswertungsprogramm Elemente vorausgewählt werden. Werden beim Auswertungsprogramm Elemente nicht berücksichtigt werden die Konzentrationen der berücksichtigten Elemente vom Programm so angepasst, dass die Summe der Konzentrationen annähernd 100 mass.-% ergibt. Somit besteht eine hohe Ungenauigkeit bei den Analysenergebnissen beim Einsatz von unerfahrenem Personal.

<sup>1</sup> <http://www.chemie.de/lexikon/> (gelesen am: 07.10.2018)

Dieses Analyseverfahren ist sehr gut geeignet für Elemente die einen hohen Anteil der Gesamtprobe ausmachen, wie in dieser Analysenreihe etwa Al, Si, P, Mg, Ca, Fe. O kann aufgrund der Tablettenherstellung mit dem O-haltigen Wachs nicht sinnvoll gemessen werden. Weiters ist die Genauigkeit der Analysenergebnisse bei Elementen mit geringer Konzentration (unter 1 mass.-%, wie etwa bei Schwermetallen) sehr gering, da der absolute Fehler teilweise größer ist als die gemessene Konzentration.

## 5.2 XRD- Röntgenpulverdiffraktometrie

Die Röntgenpulverdiffraktometrie ist eine Methode zur Untersuchung der Zusammensetzung und Struktur kristalliner Stoffe. Dabei wird ein monochromatischer Röntgenstrahl (bei dieser Analyse wurde eine Cu-Röhre verwendet) auf das Untersuchungsgebiet der Probe gerichtet. Die gemäß der Bragg'schen Gleichung an den interferenzfähigen Netzebenen der Kristallite gebeugte Strahlung wird vom Detektor registriert. Der Detektor ist beweglich gelagert und fährt die Probe halbkreisförmig ab. Es entsteht eine winkelabhängige Intensitätsverteilung, das sogenannte Diffraktogramm (Beugungsdiagramm, wird im englischen fälschlicherweise auch als Spektrum bezeichnet), dessen Maxima als Reflexe bezeichnet werden. Werden bei bekannter Wellenlänge die Winkel  $\Theta$  (bzw.  $2 \Theta$ ) gemessen, bei denen die Reflexe auftreten, so können die entsprechenden Netzebenenabstände der Kristalle errechnet werden. Die gewonnenen Ergebnisse werden anschließend mit einer Datenbank verglichen. Jede Substanz hat eine eigene typische Reflexlage. Damit lässt sich die qualitative kristallographische Phasenanalyse vornehmen. Aus der Intensität der Reflexe ist die quantitative Zusammensetzung der untersuchten Probenstellen bestimmbar. Weiters können noch temperaturabhängige Messungen durchgeführt werden, die Aussagen über das Verhalten bei Phasenübergängen liefern. Das Beugungsdiagramm des gemahlten und homogenisierten Klärschlammgranulat ist dem Anhang zu entnehmen. Dabei sind die Peaks farblich zu den entsprechenden Strukturen zugeordnet. Diese Zuordnung erfolgte mittels Software.

**Probenaufbereitung:** Die Proben wurde ungemahlen sowie gemahlen auf einer Probenträgerplatte präpariert. Dies wurde durchgeführt, um herauszufinden, ob die Probenoberfläche unterschiedliche Phasen als die homogenisierte gemahlene Probe aufweist. Bei der Mahlung musste darauf geachtet werden, dass diese nicht zu fein ist. Eine zu feine Mahlung führt zur Zerstörung der Kristallstruktur. Die angewandte Mahlung der Probe war für die Analyse ausreichend grob.

### 5.3 ICP-OES - Optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

Diese Analysenmethode wird zur quantitativen und qualitativen Analyse von festen, flüssigen und gasförmigen Proben eingesetzt. Die Methode basiert darauf, dass angeregte Atome eine für das chemische Element charakteristische elektromagnetische Strahlung aussenden und somit Informationen über die Zusammensetzung der Probe liefern. Die Anregung der Atome erfolgt über eine externe Energiezufuhr, z.B. über einen Lichtbogen, ein induktiv gekoppeltes Plasma (ICP, bei der angewandten Analyse wurde Argon zur Plasmaerzeugung verwendet). Durch die Anregung der Elektronen werden diese in höhere Schalen gehoben. Da das System aber den Zustand niedrigster Energie anstrebt wandern die Elektronen mit mehr Energie in ihre ursprüngliche Schale zurück. Dabei wird die Differenzenergie optisch frei (Emission). Durch die Optik wird das emittierte Licht so aufbereitet, dass es der Detektor detektieren kann. Für die Analysen müssen zuvor Referenzlösungen für jedes einzelne Element erstellt werden. Diese Referenzlösungen werden dann im ICP-OES analysiert und die erhaltenen Werte (Intensität bzw. Energieflussdichte) dem jeweiligen Element zugeordnet.

**Probenaufbereitung:** nach erfolgter Mahlung wurden ca. 5 g für die Ermittlung des Wassergehalts und 300 mg für die Elementanalyse verwendet. Die Proben mussten zunächst in flüssige Form übergeführt werden. Dies erfolgte durch einen Aufschluss mit 8 ml 65%  $\text{HNO}_3$  und 2 ml 32%  $\text{HCl}$  in einem PTFE Aufschlussgefäß. Dabei ist darauf zu achten, dass die rein organische Einwaage bei Verwendung von  $\text{HCl}$  nicht höher als 40 mass.-% ist, da sonst ein zu hoher Gasdruck durch Bildung von  $\text{CO}_2$  sowie  $\text{Cl}_2$  entsteht und so der Behälter beschädigt werden kann. Das Aufschlussgefäß wurde anschließend in eine Mikrowelle der MLS (Mikrowellen Laborsysteme) GmbH eingebracht und ein spezifisches Temperaturprogramm durchgeführt (Temperaturprogramm siehe Anhang). Nach erfolgtem Aufschluss wurden die festen, unlöslichen Rückstände mittels Weißbandfilter abfiltriert und das Filtrat in einem Messkolben mit Deionat auf 50 ml aufgefüllt. Anschließend erfolgt die Einbringung in das Analysengerät. Die Intensität des Lichtes der Probe wird mit der Intensität des Lichtes der Referenzlösungen verglichen. Dabei ergibt sich ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen Intensität und Konzentration. Neben der zeitintensiven Herstellung der Referenzlösungen, der begrenzten Kapazität in der zur Verfügung stehenden Mikrowelle (10 Aufschlussgefäße gleichzeitig) ist problematisch, dass nur Elemente analysiert werden können, die in Lösung übergeführt werden können. Beim Aufschluss mittels  $\text{HCl}$  und  $\text{HNO}_3$  bleiben Silikate als Rückstand übrig, da diese nur sehr schlecht gelöst werden können. Folglich muss für eine genaue Analyse ein Totalaufschluss mittels  $\text{HF}$  durchgeführt werden. Beim Totalaufschluss wurden Referenzlösungen der Elemente Al, Ca, Fe, K, Mg und Si erstellt. Aufgrund des Gefährdungspotenzials ist die Hantierung mit  $\text{HF}$  nur fachkundigem Personal vorbehalten. Die Analyseergebnisse weisen eine hohe Genauigkeit im ppm-Bereich auf und sind somit sehr gut für die Betrachtung der Schwermetallkonzentrationen geeignet. Elemente wie C, O, Cl, S, H, B können mit der verwendeten Analysenmethode nicht analysiert werden.

## 5.4 energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) im Rasterelektronenmikroskop (REM)

EDX ist eine Methode der Elektronenstrahlmikroanalyse (ESMA) und nutzt die, von einem Festkörper infolge eines Elektronenbeschusses emittierten charakteristischen Röntgenstrahlen, um die darin enthaltenen Elemente qualitativ und quantitativ zu bestimmen. Für das Verfahren ist zwingend ein fokussierter Elektronenstrahl erforderlich, wie er in REM vorhanden ist.

**Funktionsweise des Rasterelektronenmikroskops:** Ein fein fokussierter Elektronenstrahl mit Anregungsenergie  $E_0$  fällt auf die Probenoberfläche und erzeugt dort innerhalb des Wechselwirkungsvolumens (Anregungsbirne) Sekundärelektronen (SE,  $E < 50 \text{ eV}$ ) und Rückstreuielektronen (RE,  $50 \text{ eV} < E < E_0$ ). Diese werden mit einem Vervielfacher bzw. einem RE-Detektor erfasst. Das erzeugte Signal entspricht der Anzahl der jeweils emittierten SE bzw. RE. Mittels Rasterspulen wird der primäre Elektronenstrahl über einen definierten Bereich der Probe gescannt. Der dafür eingesetzte Rastergenerator steuert exakt synchron dazu auch den Elektronenstrahl einer Braun'schen Röhre an, welche zur Bilddarstellung verwendet wird. Somit kann die Oberfläche einer Probe am Bildschirm dargestellt werden.

Bei der EDX schlägt ein auf die Probe treffendes Primärelektron ein Elektron aus einem der kernnahen Energieniveaus heraus. Diese Lücke wird sofort von einem Elektron aus einem höheren Niveau gefüllt. Dabei gibt ein Röntgenquant genau jene Energie ab, die der Differenz der beiden Energieniveaus entspricht. Dieses Energieniveau ist für jedes Element spezifisch (Moseley'sches Gesetz). Der Röntgenquant wird anschließend vom Detektor aufgenommen und detektiert.<sup>1</sup> Hellere Bereiche bedeuten Elemente höherer Ordnung, jedoch erscheinen Kanten einer Probe ebenfalls heller, da an dieser Stelle die Elektronenbirne geschnitten wird und die Elektronen besser austreten. Zur genaueren quantitativen Analyse wird das sogenannte  $\rho\text{ZAF}$ -Modell herangezogen, welches Dichte ( $\rho$ ), Ordnungszahleffekte ( $Z$ ), Absorptionseffekte ( $A$ ) und Fluoreszenzeffekte ( $F$ ) korrigiert.

**Probenaufbereitung:** Die Proben wurden auf kleine doppelseitig leitende Kohlenstoffplättchen gelegt und anschließend mit einer 8 nm Gold-Palladium 60/40 Schicht besputtert (Kathodenzerstäubung) um die Probenoberfläche leitfähig zu machen. Die Aschepellets wurden zuvor zerdrückt, das Bettmaterial wurde aufgelegt. Dabei wurde darauf geachtet, dass keine Verunreinigungen aufgebracht werden. Das Klärschlammgranulat ließ sich nicht zerdrücken, folglich wurde eine ausreichende Menge von der Oberfläche abgerieben und anschließend analysiert.

Problematisch bei dieser Analysenmethode ist jedoch, dass bei niedrigen Elementanteilen der Messfehler teilweise größer als die Elementanteile ist. Jedoch ist dieses Verfahren für eine schnelle Analyse einer großen Anzahl von Proben geeignet.

<sup>1</sup> BAUCH & ROSENKRANZ 2017, S. 60

## 5.5 Auswahl einer Analyse­methode zur Interpretation der Ergebnisse

In diesem Kapitel erfolgt eine Gegenüberstellung der eingesetzten Analyse­methoden, mit denen die Elementkonzentrationen gemessen wurden. Bei der Auswahl welche Analyse­ergebnisse herangezogen und für den Vergleich der Versuche verwendet wurden, sind nachfolgend Überlegungen durchgeführt worden.

### RFA:

- Elemente, die in der Probe vermutet werden, müssen bei der Auswertung ausgewählt werden;
- Hochrechnung der Anteile einzelner Elemente auf 100 mass.-%,
  - Verfälschung der Ergebnisse, wenn die Elemente bei der Auswertung nicht im Programm ausgewählt werden;
- Sauerstoff sowie Kohlenstoff müssen aufgrund des eingesetzten Wachses herausgerechnet werden und sind somit nicht sinnvoll detektierbar;
- bei geringen Konzentrationen entsteht ein großer absoluter Messfehler,
- für quantitative Analysen der Hauptinhaltsstoffe geeignet, sofern eine exakte Auswahl der Elemente im Auswertungsprogramm erfolgt.

### REM-EDX:

- nur oberflächliche Elementanalyse möglich;
- durch passende Probenpräparation Linescans von Brennstoffquerschnitten möglich;
- für schnelle Analysen einer großen Probenanzahl geeignet;
- bei geringen Konzentrationen entsteht ein großer Messfehler

### ICP-OES:

- Referenzlösungen für die zu betrachteten Elemente müssen hergestellt werden;
- es wird die Masse des Elements in der eingesetzten Probenmasse analysiert;
  - keine Verfälschung der Ergebnisse durch die Auswertung wie bei der RFA,
  - folglich muss die ungefähre Zusammensetzung vor der Analyse nicht bekannt sein,
- für sehr geringe Konzentrationen (zweistelliger ppm Bereich) geeignet;
- begrenzte Kapazität mit 10 Aufschlussgefäßen pro Mikrowelle.

Resultierend wurden die Analyse­ergebnisse der ICP-OES Analyse herangezogen, um die Ergebnisse der Versuchsreihe miteinander zu vergleichen. Diese Analyse­methode wird für den Nachweis der Schwermetalle als zweckmäßiger erachtet, da diese teilweise sehr geringe Konzentrationen im zweistelligen ppm Bereich aufweisen. Da bei der XRD die Anteile an kristallinen Phasen gemessen wurden, wird dies nicht für die Gegenüberstellung der Elementkonzentrationen der Versuchsreihe herangezogen. Die Ergebnisse der XRD werden in dieser Forschungsarbeit nur qualitativ angeführt. Es eignet sich jedoch für die quantitative Bewertung gesetzlich zugelassener Elementverbindungen sowie für eine detaillierte Aufschlüsselung der mineralischen Phasen in den Aschen.

## 6 Versuchsergebnisse und relevante Versuchserkenntnisse

In diesem Kapitel werden jene Versuchsergebnisse und Erkenntnisse angeführt, die hinsichtlich der Betrachtung des Phosphors und der Schwermetalle in Kapitel 7 relevant sind. Es werden die tatsächlichen Versuchstemperaturen, Strömungszustände innerhalb der Versuchsapparatur sowie die Gaszusammensetzungen beschrieben. Bei Letzteren wird eine Gegenüberstellung mit Vergasungsversuchen an der TU Wien durchgeführt. Es erfolgt eine Darstellung der produzierten Aschen für die Beschreibung der optischen Unterschiede. Aufgrund der in Kapitel 5.5 beschriebenen Wahl der Analyseverfahren werden die Ergebnisse der ICP-OES Analyse herangezogen. Weiters werden die unterschiedlichen Aschefraktionen der Versuche miteinander verglichen. Auf die Ergebnisse der Röntgenpulverdiffraktometrie (XRD) wird nur qualitativ eingegangen. Die Versuchsergebnisse aller Analysen werden im Anhang tabellarisch zusammengefasst sowie die Ergebnisse der ICP-OES Analyse in Diagrammen dargestellt.

### 6.1 Tatsächliche Versuchstemperaturen

Die in Kapitel 4.3 definierten Temperaturen konnten bei den realen Versuchen nur innerhalb von Temperaturbereichen eingehalten werden. Hierbei wurde bei den Betttemperaturen in Nieder- und Hochtemperaturbereich unterschieden. Dabei schwankten die Temperaturen bei den verschiedenen Versuchen zwischen den folgenden Werten.

Tabelle 30: Temperaturbereiche des Bettes bei den Versuchen

<b>Betttemperatur T4</b>	
Niedertemperaturbereich	Hochtemperaturbereich
720 – 780 °C	920 – 980 °C

Neben dem Verlauf der Betttemperatur T4 wurden auch die Verläufe für die Temperaturen Vorwärmluft T2, Freeboard T5, Bunker T6, Reaktor oben T7 und Abgas/Abzug T8 aufgezeichnet. Zur Darstellung der Temperaturverläufe werden die verschiedenen Temperaturen beispielhaft anhand des Versuchs 1 in Abbildung 27 angeführt. Die Temperaturverläufe der gesamten Versuchsreihe sind dem spezifischen Versuchsprotokoll zu entnehmen.<sup>1</sup> Die angestrebte Betttemperatur des Versuchs 1 war laut Tabelle 28 750°C, wobei das Bettmaterial Quarzsand verwendet und als Brennstoff Klärschlammgranulat eingesetzt wurde. Die Apparatur wurde bei diesem Versuch auf ca. 650°C vorgewärmt und anschließend die Brennstoffzufuhr gestartet. Nach dem Start der Brennstoffzufuhr stiegen die Temperaturen in Bett, Freeboard, Reaktor oben und Abgas/Abzug an. Lediglich die Vorwärmtemperatur wurde abgesenkt. Dies erfolgte aufgrund der Nachregelung, um die im Bett angestrebte Temperatur einzustellen.

<sup>1</sup> THELEN 2018

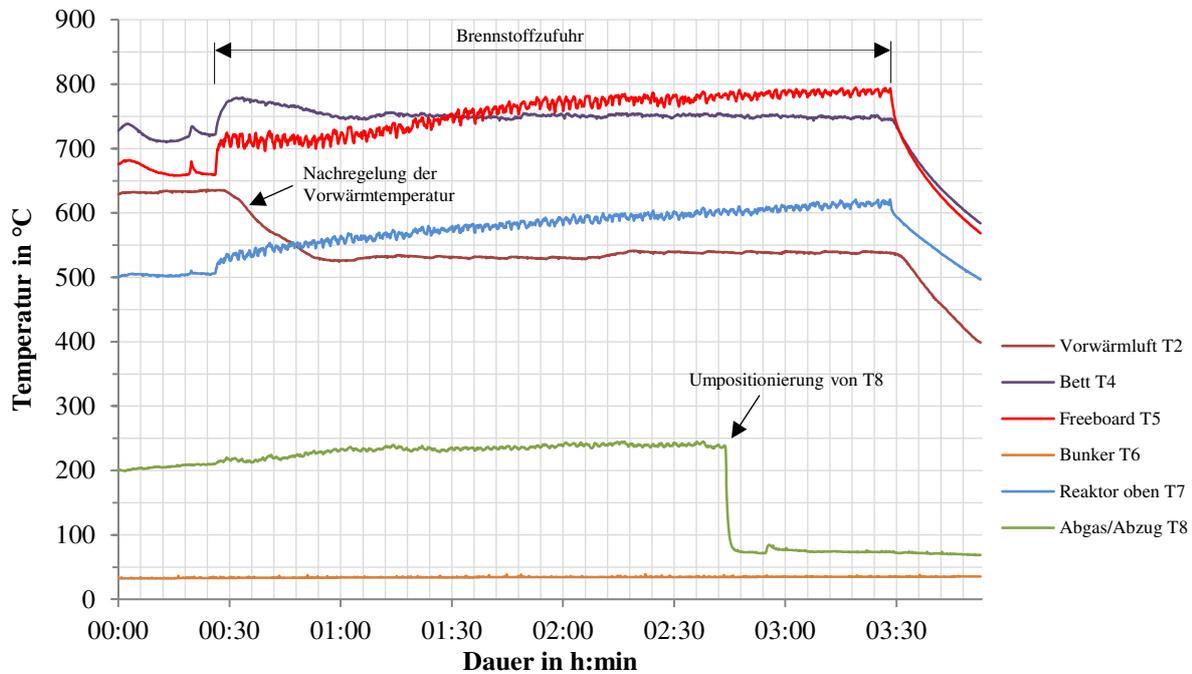


Abbildung 27: Temperaturverläufe eines Verbrennungsversuchs (Versuch 1)

Es wurde festgestellt, dass eine Variation der Lufttemperatur bei der Vorwärmung größeren Einfluss auf die Betttemperatur hat als eine Variation der oberen Heizschalentemperatur. Diese Erkenntnis erscheint plausibel, da der Wärmeaustausch zwischen der eingeblasenen Luft und dem Bett effizienter als zwischen der Reaktorwand und dem Bett ist. Nach Beendigung der Brennstoffzufuhr und Abschaltung aller Heizungen erfolgte eine rasche Abkühlung der Anlage aufgrund der eingebrachten kühlen Luft.

In Abbildung 27 ist ersichtlich, dass die Temperatur des Freeboards über die Temperatur des Bettes stieg. Dies wird auf zwei mögliche Phänomene eingegrenzt. Einerseits können, wie in Kapitel 2.5 beschrieben, die leicht flüchtigen Bestandteile des Klärschlammteilchens im Bett der stationären Wirbelschicht entgasen und oberhalb des Bettes unter Energiefreisetzung teilweise oxidieren (partial heat release). Andererseits kann Klärschlammstaub, der aufgrund des förderungsbedingten Abriebs entstanden ist, schon während dem Herabfallen im Freeboard verbrennen. Eine Temperaturerhöhung aufgrund eines Wärmestaus durch Verstopfung bzw. Agglomeration konnte ausgeschlossen werden, da nach der Entleerung hierfür keine Spuren erkennbar waren. Das Bettmaterial sowie die Asche waren rieselfähig.

Bei der Messung der Temperatur von Abgas/Abzug kam es zu einem schlagartigen Temperatursturz. Dies resultierte durch die Umpositionierung der Messsonde T8. Da diese Messsonde vor dem beheizten Filter angebracht war, kam es lokal zu einer Verstopfung des Rohrquerschnittes durch Flugasche. Anschließend wurde die Messsonde T8 für alle weiteren Versuche in der Abzugshaube montiert. Bei allen Versuchen lag die Temperatur der Messsonde T8 unterhalb von 80°C.

## 6.2 Gaszusammensetzung und Vergleich mit Literaturergebnissen

Bei der Versuchsreihe wurde darauf geachtet, dass je nach Art der thermischen Behandlung ein Sauerstoffüberschuss bzw. -mangel vorhanden war, um zu gewährleisten, dass eine Verbrennung bzw. Vergasung vorliegen. Die Bereiche der Gaszusammensetzungen der gesamten Verbrennungsversuche ist in Tabelle 31 und der gesamten Vergasungsversuche in Tabelle 32 ersichtlich. Weiters erfolgt eine Gegenüberstellung diverser Vergasungsversuche von Klärschlamm an der TU Wien. Bei den Verbrennungsversuchen ist ein deutlicher Sauerstoffüberschuss sowie geringe Konzentrationen von H<sub>2</sub> und CO aufgetreten.

Tabelle 31: Gemessene Gaszusammensetzung der Verbrennungsversuche

Gas	H <sub>2</sub>	CO	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Einheit	vol.-% <sub>tr</sub>			
Bereich	0,1 - 0,7	0,3 - 0,8	3,8 – 8,6	10 – 15,9

Bei den Vergasungsversuchen konnte die charakteristischen erhöhten Konzentrationen von H<sub>2</sub>, CO sowie ein Sauerstoffmangel festgestellt werden. Die exakten Gaszusammensetzungen der gesamten Versuchsreihe sind dem spezifischen Versuchsprotokoll zu entnehmen.<sup>1</sup>

Bei der Gegenüberstellung der Gaskomponenten in Tabelle 32 sei erwähnt, dass im Zuge dieser Versuchsreihe eine Vergasung mit Luft durchgeführt wurde. Bei den Versuchen an der TU Wien wurde mit Wasserdampf vergast. Durch die Vergasung mit Wasserdampf steigt der Anteil an H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, sowie CH<sub>4</sub> und sinkt der Anteil an N<sub>2</sub>.

Tabelle 32: Gegenüberstellung der Gaskomponenten von Vergasungsversuchen

Gas	H <sub>2</sub>	CO	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> S	NH <sub>3</sub>	N <sub>2</sub>
Einheit	vol.-% <sub>tr</sub>							
Versuchsreihe	2,6 - 7,5	4,1 - 9,2	0 - 0,4	14,3 - 19,3	-	-	-	63,6-79**
TU Wien 2012 <sup>2</sup>	39,2	16,3	-	25,4	7,8	*	3,44	0,5-2,0
TU Wien 2019 <sup>3</sup>	30,3	11,7	-	31,1	10,0	1,02	4,28	0,5-2,0
nicht gemessen								
*C <sub>4</sub> -, C <sub>5</sub> -Kohlenwasserstoffe, NH <sub>3</sub> und H <sub>2</sub> S (1,0-4,0 vol.-%)								
** berechneter Wert								

Aufgrund des hohen Inertanteils des, bei der Versuchsreihe erzeugten Produktgases ist mit einem niedrigeren Heizwert als bei den Vergasungsversuchen mit Wasserdampf zu rechnen. Die 2012 und 2019 durchgeführten Klärschlammvergasungsversuche an der TU Wien zeigten, das mit der neuen Zweibett-Wirbelschicht-Dampfvergasungstechnologie unter den angeführten Prozessspezifikationen ein stickstoffarmes Produktgas erzeugt werden kann. Dabei hatte das Produktgas bei den Versuchen 2019 einen Heizwert von 10,53 MJ/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub>. Der dabei verwendete Klärschlamm weist eine ähnliche Zusammensetzung auf als jener der Versuche 2012.

<sup>1</sup> THELEN 2018

<sup>2</sup> vgl. SCHMID u. a. 2012, S. 210

<sup>3</sup> vgl. SCHMID, BARTIK, u. a. 2019

Vergleiche des  $\text{NH}_3$  Gehalts im Produktgas der Klärschlammvergasung mit dem der Weichholzvergasung zeigen, dass bei Klärschlamm ein deutlich höherer Anteil erzeugt wurde ( $\text{NH}_3$  Gehalt Weichholz 0,15 vol.-%<sub>tr</sub>). Dies gilt auch für den  $\text{H}_2\text{S}$  Gehalt der bei dem verwendeten Klärschlamm 1,02 vol.-%<sub>tr</sub> und bei Weichholz 0,0175 vol.-%<sub>tr</sub> beträgt. Der hohe  $\text{NH}_3$  und  $\text{H}_2\text{S}$  Gehalt ist auf den hohen Stickstoff und Schwefelgehalt im Klärschlamm zurückzuführen, wobei der Schwefel aufgrund der Eisenfällung in der Kläranlage als Eisensulfid ( $\text{FeS}$ ) im Klärschlamm gebunden wurde. Herausforderungen stellten sich jedoch hinsichtlich des Eisengehaltes in der Klärschlamm-Asche. Das Eisen oxidiert im Verbrennungsreaktor (CR) zu Eisen(III)-oxid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) und wird unter Freisetzung des Sauerstoffes im Vergasungsreaktor (GC) zu Eisen(II)-oxid ( $\text{FeO}$ ) reduziert.<sup>1</sup> Durch diesen Sauerstoffeintrag kommt es zu einem erhöhten Anteil an  $\text{CO}_2$  der den Heizwert des Produktgases negativ beeinflusst jedoch ist anzunehmen, dass die unerwünschte Teerbildung vermindert wird.

Der in dieser Forschungsarbeit eingesetzte Klärschlamm weist im Vergleich mit dem der Versuche TU Wien 2012 und 2019 einen höheren C und N Gehalt auf, jedoch einen niedrigeren Aschegehalt. Der Gehalt an S ist annähernd ident. Folglich ist aufgrund des hohen N und S Gehalts des, in dieser Versuchsreihe betrachteten Klärschlamm ebenfalls mit einem erhöhten  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  Gehalt oder anderen N und S Komponenten zu rechnen.

---

<sup>1</sup> vgl. SCHMID, BARTIK, u. a. 2019

## 6.2.1 Kalzinierung bei den Versuchen mit Kalkstein als Bettmaterial

Der Konzentrationsverlauf von CO<sub>2</sub> während der endothermen Reaktion CaCO<sub>3</sub> zu CaO und CO<sub>2</sub> wird anhand des Versuchs 16 dargestellt. Während der Aufheizphase ist die Steigerungsrate der Betttemperatur aufgrund der endothermen Ausgasung des CaCO<sub>3</sub> gesunken. Die Reaktion startete bei einer Temperatur von ca. 660°C, war nach ca. einer Stunde und einer erreichten Temperatur von ca. 830°C abgeschlossen. Der Anstieg der CO<sub>2</sub> Konzentration erfolgte aufgrund des Todvolumens der Messleitung erst zeitversetzt zur Messdatenaufzeichnung der Betttemperatur. Nach 50 Minuten wurde die Heiztemperatur stufenweise erhöht. Dies führte zu einer erhöhten Ausgasungsrate. Bei ca. 780°C wurde die maximale CO<sub>2</sub> Konzentration gemessen.

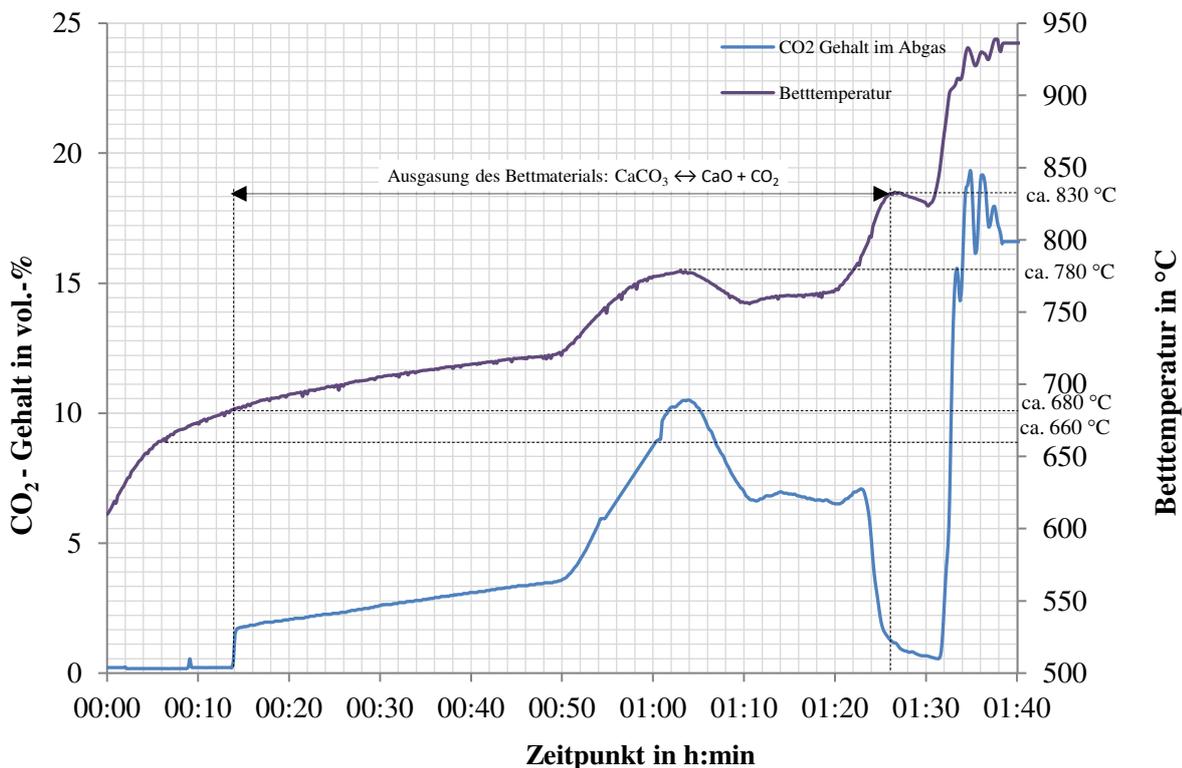


Abbildung 28: Verlauf der CO<sub>2</sub> Konzentration während der Aufheizphase im Zuge des Versuchs 16

Das Sinken der CO<sub>2</sub> Konzentration zeigte das Abklingen der Ausgasung. Anschließend wurde die Brennstoffzufuhr gestartet (Zeitpunkt 1:30 h). Nach diesem Zeitpunkt führte die thermische Verwertung der Klärschlamm pellets zu einem Anstieg des CO<sub>2</sub> Gehaltes. Durch die Entgasung des CO<sub>2</sub> aus dem Bettmaterial vor Versuchsbeginn konnte der CO<sub>2</sub> Gehalt, der bei der Verwertung des Klärschlamm entstanden ist, gemessen werden. Weiters können etwaig auftretende Effekte im Zusammenhang mit dem Bettmaterial, wie z.B. Agglomeration (siehe Kapitel 6.4, Abbildung 43, Abbildung 41 und Kapitel 7.2) vorwiegend auf das entstandene CaO zurückgeführt werden.

### 6.3 Strömungszustände innerhalb der Versuchsanlage

Die für die Versuchsreihe eingestellten Strömungszustände sind in der nachfolgenden Abbildung ersichtlich. Es wurden die Strömungszustände im Bett sowie im Freeboard bei 750°C, 950°C mit den Bettmaterialien Quarzsand und Kalkstein betrachtet. Dabei ergab sich bei den gewählten Prozessparametern sowohl im Wirbelbett als auch im darüberliegenden Freeboard eine blasenbildende Wirbelschicht. Aufgrund der gewählten Prozessparameter ergeben sich Bereiche weit unterhalb der theoretischen Geschwindigkeit, bei der die Partikel der Bettmaterialien ausgetragen werden. Somit wird die Annahme getroffen, dass bei der durchgeführten Versuchsreihe nur ein vernachlässigbar kleiner Anteil an Bettmaterial ausgetragen wurde. Diese Annahme wird in Kapitel 7 zur Betrachtung der Phosphorbilanz herangezogen.

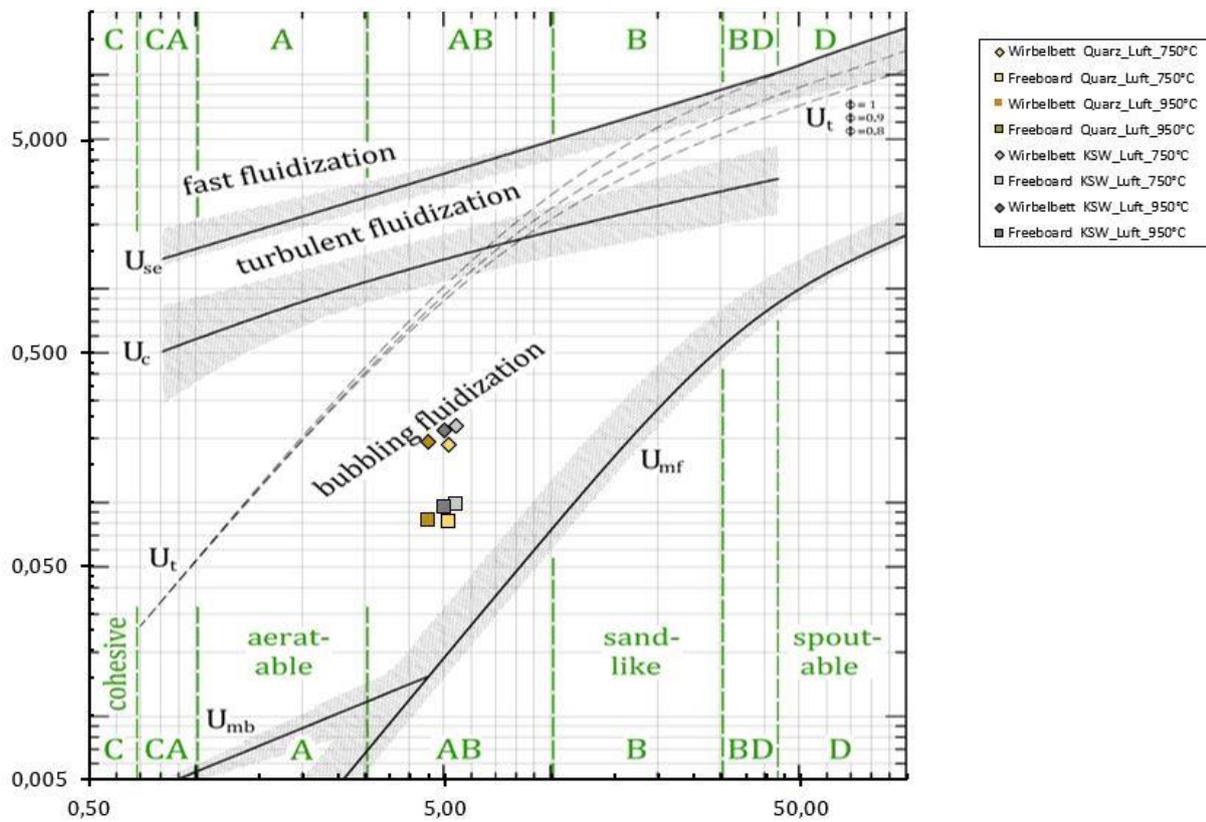


Abbildung 29: Strömungszustände in den unterschiedlichen Bereichen der Wirbelschichtlaboranlage

## 6.4 Bilder der produzierten Aschen

Im Zuge der Versuchsreihe konnten bei den produzierten Aschen in Abhängigkeit der gewählten Prozessparameter optische Unterschiede festgestellt werden. Es wird eine Gegenüberstellung hinsichtlich der optischen Veränderung (Färbung, Form, Größe, Agglomeration etc.) des Bettmaterials sowie der produzierten Aschen durchgeführt. Weiter sollen die Ergebnisse dieses optischen Vergleichs in Kombination mit den Analyseergebnissen Erkenntnisse über etwaig ablaufende Reaktionsmechanismen liefern. In Abbildung 30 bis Abbildung 39 werden die Verbrennungsversuche und in Abbildung 40 bis Abbildung 49 die Vergasungsversuche gegenübergestellt.

Bei den Versuchen mit dem Edukt Klärschlammgranulat kommt es geometrisch lediglich zu einer Verringerung des Durchmessers. Die Aschen dieser Versuche sind rieselfähig, weisen keine Agglomeration zwischen veraschten Granulatkugeln auf und können optisch vom Bettmaterial unterschieden werden. Bei den Vergasungsversuchen haben die Aschen eine gräuliche Färbung, wobei dies auf den Restkohlenstoffgehalt zurückzuführen ist. Bei den Aschen der Verbrennungsversuche dominiert die beige Färbung. Dies stammt vermutlich vom hohen Eisengehalt, bedingt durch die Eisenfällung des Klärschlammes in der Kläranlage. Bei den Vergasungsversuchen sind weiters dunklere Granulatkugeln erkennbar, die bei der Entnahme der Aschen und des Bettmaterials anlagenbedingt aus der abgeschalteten Fördereinrichtung als Edukt eingebracht wurden. Diese Granulatkugeln wurden für die Analysen der Aschen nicht verwendet.

Die Färbung der Aschen bei den Versuchen mit dem Edukt Klärschlamm pellets sind auf dieselben Umstände zurückzuführen wie bei der Veraschung von Klärschlammgranulat. In Abbildung 35 ist ein Teil der aufgrund des Anlagenverschleißes von der Reaktorinnenwand abgetragenen Verzunderung zu sehen. Weiter kann bei einer Betrachtung der Abbildung 33 festgehalten werden, dass einige veraschte Pellets eine rotbraune Färbung aufweisen. Dies resultiert aus einer unvollständigen Verbrennung. Die veraschten rotbraunen Pellets wurden ebenfalls nicht für die Analysen herangezogen. Bei den Vergasungs- und Verbrennungsversuchen mit Klärschlamm pellets und dem Einsatz des Bettmaterials Kalkstein kam es zur Agglomeration, wobei dieser Effekt bei den Vergasungsversuchen verstärkt auftrat (siehe Abbildung 41 und Abbildung 43). Beim Versuch 15 (Abbildung 43) führte es zu einer Verstopfung der Anlage. Nähere Beschreibung der Ursache ist in Kapitel 7.2 vorzufinden.



Abbildung 38:  
Klärschlammgranulat



Abbildung 36: Versuch 1



Abbildung 34: Versuch 2



Abbildung 32: Versuch 3



Abbildung 30: Versuch 4



Abbildung 39:  
Klärschlamm pellets



Abbildung 37: Versuch 9



Abbildung 35: Versuch 10



Abbildung 33: Versuch 11



Abbildung 31: Versuch 12



Abbildung 48:  
Klärschlammgranulat



Abbildung 46: Versuch 5



Abbildung 44: Versuch 6



Abbildung 42: Versuch 7



Abbildung 40: Versuch 8



Abbildung 49:  
Klärschlamm pellets



Abbildung 47: Versuch 13



Abbildung 45: Versuch 14



Abbildung 43: Versuch 15



Abbildung 41: Versuch 16

## 6.5 Analysenergebnisse der Versuche

Die in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse sind Analysenergebnisse der ICP-OES. Diese Ergebnisse ermöglichen eine Gegenüberstellung der Elementkonzentrationen in den Edukten und Produkten. Dabei handelt es sich um die Aschen und Bettmaterialien der Versuche. Es werden jeweils die, in den einzelnen Proben analysierten Konzentrationen dargestellt. Weiters werden die Aschegehälter tabellarisch angeführt, die zur Berechnung der Bilanzen in Kapitel 7 verwendet wurden. Dadurch können die Aschegehälter verglichen werden. Es werden die Ergebnisse der XRD Analyse qualitativ angeführt, die die grundlegenden Erkenntnisse hinsichtlich des Phosphors für die Bilanzierung in Kapitel 7 liefern.

Zur Erklärung der Ergebnisse in Abbildung 50 und Tabelle 33 werden die Produktfraktionen anschließend definiert. Die Flugasche (Fa) ist jene Asche, die unter den jeweiligen Versuchsparametern mit dem Gasstrom mitgerissen und aus der stationären Wirbelschicht ausgetragen wird. Die Bettasche (Ba) ist demnach jene Asche, die nach Abschaltung der Wirbelschichtanlage im Bettbereich entnommen wird. Es wird jedoch nur jene Asche als Bettasche bezeichnet, die möglichst ohne Bettmaterialrückstände abgesiebt werden konnte, um bei der Analyse der Bettasche eine Kontamination durch Bettmaterial (Bm) gering zu halten. Dadurch konnte die Asche, die eine ähnliche Partikelgröße wie das Bettmaterial aufweist, nicht separiert werden und findet sich als Ascherückstand (Ar) im Bettmaterial wieder. In Tabelle 33 werden die Gehälter dieser Aschefraktionen dargestellt.

In Abbildung 50 werden die ICP-OES Analysenergebnisse der jeweiligen Versuchsfraktionen beispielhaft anhand des Elements Phosphor dargestellt. Die ICP-OES Analysenergebnisse für Schwermetalle sowie den restlichen gemessenen Elementen sind im Anhang vorzufinden. Im Bettmaterial Quarzsand konnte vor Versuchsbeginn die Phosphorkonzentration nicht eindeutig bestimmt werden, da die Konzentration unterhalb der Nachweisbarkeitsgrenze ( $< 7,9444$  ppm) liegt. Im Bettmaterial Kalkstein wurde vor Versuch eine Phosphorkonzentration von  $14,795$  ppm analysiert. Die Phosphorkonzentrationen in den Edukten Klärschlammgranulat und Klärschlamm pellets weisen ähnliche Werte auf. Die Konzentrationen in der Fraktion Ba schwankt bei den Versuchen aufgrund des differierenden Aschegehalts. Weiters hat der Gehalt an Ar Auswirkungen auf die Phosphorkonzentration in der Fraktion Bm&Ar, wodurch dieser von Versuch zu Versuch variiert.

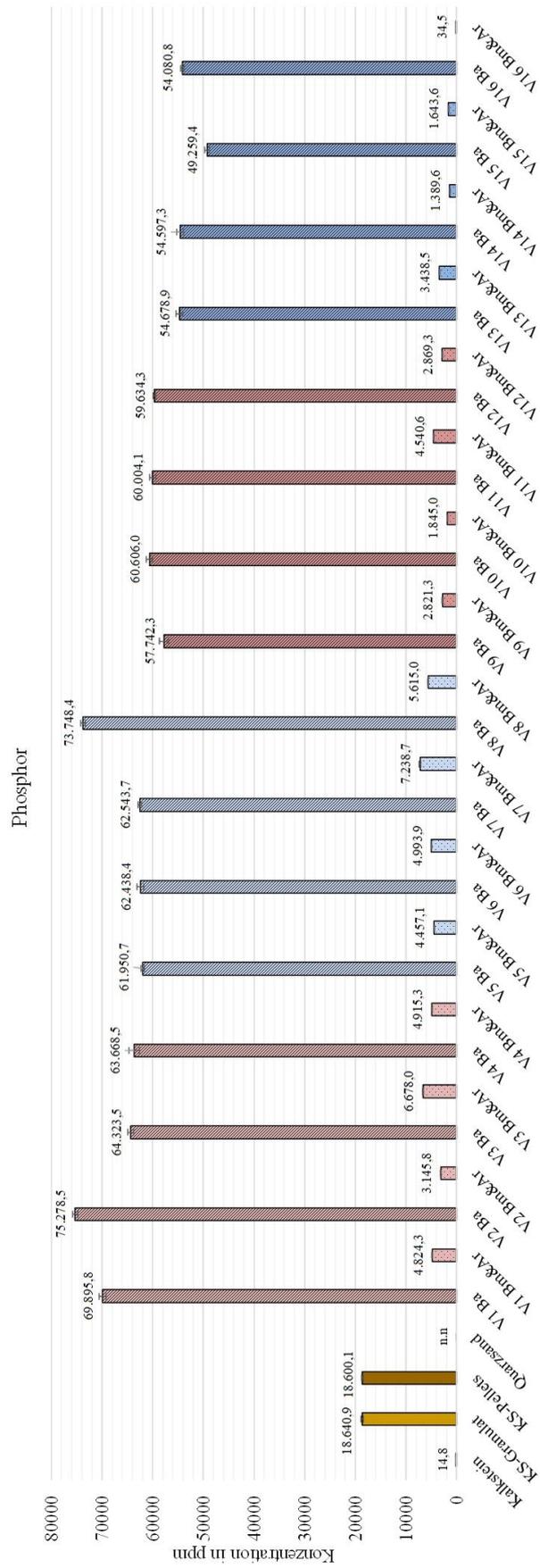


Abbildung 50: Konzentration von Phosphor in den analysierten Fraktionen Bettasche (Ba) und Bettmaterial&Ascherückstände (Bm&Ar)

Tabelle 33: Aschegehälter der Versuche

Bezeichnung	Gesamtaschegehalt (Ga)**	Bettaschegehalt (Ba)*	Flugaschegehalt (Fa)**	Aschegehalt in Bett (Ar)**
Einheit	mass.-%			
V1	26,67	20,73	0,58	5,36
V2	24,76	13,11	8,08	3,56
V3	28,98	29,22	-2,73***	2,49
V4	29,28	13,52	13,40	2,36
V5	30,09	17,64	7,92	4,54
V6	29,85	12,65	14,14	3,06
V7	29,80	18,72	8,98	2,10
V8	25,28	16,40	7,72	1,16
V9	32,21	15,13	13,49	3,59
V10	30,69	23,95	4,62	2,11
V11	31,00	31,26	-2,22***	1,96
V12	31,19	23,33	5,21	2,65
V13	34,02	19,67	11,85	2,50
V14	34,07	17,64	15,41	1,01
V15	37,76	25,47	11,73	0,56
V16	34,39	25,80	8,59	0,01
*gemessener Wert				
**berechneter Wert				
*** Berechnung über Phosphorbilanz anhand Realdaten				

Der Anteil an Ar bei den Vergasungsversuchen (V5-V8, V13-V16) ist niedriger als bei den vergleichbaren Verbrennungsversuchen (V1-V4, V9-V12). Dies liegt resultierend darin, dass die Aschen der Vergasungsversuche optimalere geometrische Eigenschaften für die durchgeführte Trennung vom Bettmaterial aufweisen. Weiters zeigte sich, dass die Abtrennung bei den Vergasungsversuchen mit Klärschlamm pellets (V13-V16) effizienter erfolgte als bei den Versuchen mit Klärschlammgranulat (V5-V8).

Bei den Verbrennungsversuchen mit Klärschlammgranulat (V1-V4) ist der Anteil an Fa höher als bei vergleichbaren Versuchen mit Klärschlamm pellets (V9-V12). Es wird darauf geschlossen, dass die Aschen bei den Verbrennungsversuchen des Klärschlammgranulats andere physikalische Eigenschaften (vorwiegend Partikelgewicht und -geometrie) aufweisen. Dabei wird ein Austrag aus der stationären Wirbelschicht begünstigt und somit ein höherer Flugaschegehalt erzielt. Die negativen Flugaschegehälter des Versuchs 3 und 11 sind auf die Berechnung über die Phosphorbilanz mittels realer Messergebnisse zurückzuführen.

## Ergebnisse der Röntgenpulverdiffraktometrie (XRD)

Hier werden exemplarisch die Ergebnisse einer Röntgenpulverdiffraktometrie des Edukts Klärschlammgranulat dargestellt.

Tabelle 34: Ergebnisse der XRD des Edukts Klärschlammgranulat

Verbindung	CaCO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	KAIP <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	Kalium-Aluminium Silikate	K <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Titan-Aluminium Silikate
Einheit	mass.-%					
Wert	41,8	23,8	10,3	9,5	8,4	6,1

Diese Analysenergebnisse bestätigen die Beschreibung in Kapitel 2.2, dass der Phosphor nicht als reines P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> vorliegt, sondern in verschiedenen mineralischen Phasen gebunden ist. Hierbei ist erkennbar, dass das Ausgangsmaterial durch einen hohen Anteil an Kalkstein (CaCO<sub>3</sub>) geprägt wird.

Bei der Betrachtung des Beugungsdiagrammes (siehe Anhang) ist ein auffälliger amorpher Bereich erkennbar („röntgenamorpher Buckel“). Da bei der Röntgenpulverdiffraktometrie nur kristalline Strukturen analysiert werden, können folglich keine Elementverbindungen im amorphen Zustand nachgewiesen werden. Beispielsweise fällt auf, dass keine Eisen-, Schwermetallverbindungen von der XRD erfasst wurden. Es wird vermutet, dass diese Elemente in amorphen Zustand bzw. in Komplexen eingebaut sind und daher nicht mit einem idealen Kristallgitter aus der Datenbank verglichen werden können. Der große amorphe Bereich lässt sich auf den organischen Anteil des unzureichend thermisch behandelten Klärschlammgranulates zurückführen. Eine Quantifizierung dieses röntgenamorphen Bereichs war nicht möglich.

Für die, bei der Versuchsreihe erhaltenen Proben wurden XRD Analysen durchgeführt. Die maßgebende Erkenntnis aus den Versuchsergebnissen ist, dass der Phosphor aufgrund des hohen Calciumgehaltes mehrheitlich in Form von hochschmelzenden Calciumphosphaten vorliegt. Dies deckt sich mit den Angaben der Literatur laut Kapitel 2.2 und 2.7.2. Zwischen Verbrennung und Vergasung mit Additiven zeigte sich eine unterschiedliche Zusammensetzung der mineralischen Aschephases. Dieser Unterschied resultiert darin, dass die Aschen der Vergasung mehrheitlich Chlorapatit aufweisen. Es wird vermutet, dass ein erhöhter Chlorgehalt unter den vorliegenden Bedingungen eine Agglomeration begünstigen. Nähere Beschreibung der Ursache zur Agglomeration ist in Kapitel 7.2 vorzufinden. Die quantitative Auswertung wird im Zuge dieser Diplomarbeit nicht durchgeführt. Diese Auswertung erfolgt jedoch in derzeitigen Forschungsarbeiten.

## 7 Diskussion

Hierbei werden die Konzentrationen in den Aschen diskutiert. Es werden die Ergebnisse der Analyse­methode ICP-OES beschrieben und anhand von Bilanzen interpretiert, wobei vorwiegend nur auf Phosphor und die, für die Einhaltung von Grenzwerten in Düngemitteln relevanten Schwermetalle eingegangen wird. Aufgrund der fehlenden apparativen Möglichkeit einer effizienten Flugascheabscheidung aus dem Abgasstrom wurde die Flugasche nicht analysiert. Resultierend wird angenommen, dass die Elementkonzentrationen der Flugasche den Elementkonzentrationen der Bettasche entsprechen. Weiters wird angenommen, dass eine vollständige Kalzinierung des Bettmaterials Kalkstein stattgefunden hat (siehe Kapitel 6.2), sowie während der Versuchsreihe ein vernachlässigbar kleiner Anteil an Bettmaterial aufgrund der eingestellten Strömungszustände nach Kapitel 6.3 ausgetragen wurde.

### 7.1 Phosphor

Zur Beantwortung der Forschungsfrage, welche Art der thermischen Umwandlung von Klärschlamm die bestmöglichen Voraussetzungen für die Phosphorrückgewinnung aus der erzeugten Klärschlammasche schafft, werden in Abbildung 51 eine P-Massenbilanz anhand eines ausgewählten Referenzversuchs und in Tabelle 35 die P-Anteile in den Fraktionen nach den Versuchen dargestellt. Für die P-Massenbilanzen der Versuche werden einige Annahmen getroffen. In Anlehnung an die Beschreibung der Bindungsformen des Phosphors in der Klärschlammasche nach Kapitel 2.2, den Untersuchungen der Aschephase nach Kapitel 2.7.2 sowie der Prozessbeschreibung unter welchen Voraussetzungen Phosphor in die Gasphase nach Kapitel 2.7.1 übergeht wird davon ausgegangen, dass Phosphor bei den bestehenden Prozessbedingungen dieser Versuchsreihe in kristalliner Form vorliegt und nicht über das Abgas ausgetragen wird. Der Phosphor verbleibt somit vollständig in den Fraktionen Flugasche (Fa), Bettasche (Ba) sowie dem Bettmaterial&Ascheresten (Bm&Ar). Bei der Auswertung der Analyseergebnisse wurde weiters festgestellt, dass die Elemente Aluminium, Calcium, Magnesium und Silizium ebenfalls in den Aschefractionen verbleiben. Die Gegenüberstellung dieser Elemente ist der fachspezifischen Literatur zu entnehmen.

Aufgrund der Tatsache, dass die Phosphorkonzentrationen der Klärschlammaschen ca. das  $2 \cdot 10^3$ -fache der Nachweisbarkeitsgrenze des Quarzsandes ( $< 7,9444$  ppm) betragen, wurde der anteilmäßig mögliche Phosphoreintrag durch Quarzsand als vernachlässigbar klein eingestuft. Resultierend wird der Phosphor bei den Versuchen mit Quarzsand zu 100 mass.-% durch das Klärschlammgranulat bzw. die Klärschlamm­pellets in die Wirbelschicht eingebracht. Bei den Versuchen mit Kalkstein wird ein geringer Anteil an Phosphor durch das Bettmaterial Kalkstein zugeführt, da darin vor dem Versuch eine Phosphorkonzentration von 14,795 ppm analysiert wurde (siehe Tabelle 36).

Für die Phosphorrückgewinnung ist ein möglichst hoher Anteil an Phosphor in den Fraktionen Flugasche und Bettasche (Fa&Ba) anzustreben. Betrachtet man die Anteile des Phosphors in der Fa&Ba der Versuche in Tabelle 35, so wird festgestellt, dass durch die gewählten Versuchsparameter und Ascheaufbereitungsmethoden ca. 79 – 99 mass.-% des Phosphors in diesen Fraktionen vorzufinden sind. Die P-Anteile in der Fraktion Ba von V3 und V11 mit einem Wert über 100 mass.-% ist auf die Berechnung mit realen Messergebnissen zurückzuführen.

Beim Vergleich der Vergasungsversuche mit den Verbrennungsversuchen ist auffällig, dass bei den Vergasungsversuchen ein niedrigerer Phosphoranteil in der Fraktion Bm&Ar ist. Da die Fraktionen Fa&Ba einen relativ hohen Anteil des Phosphors besitzen ist davon auszugehen, dass der Anteil des Phosphors in der Fraktion Bm&Ar größtenteils durch die Ascherückstände geprägt wird. Diese Annahme wird gestützt durch die Betrachtungen des Versuchs 16 in Abbildung 51.

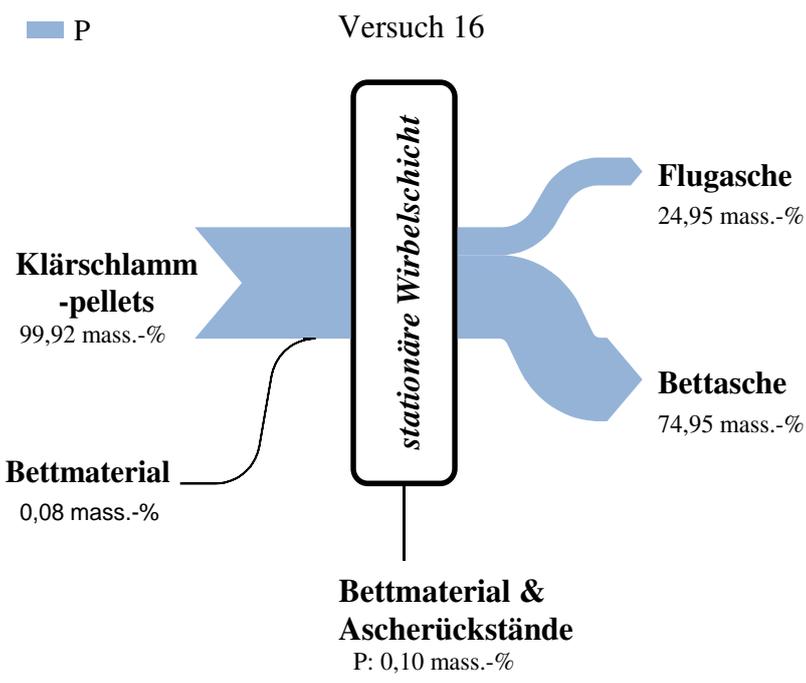


Tabelle 35: P Anteil in den Fraktionen nach den Versuchen

Bezeichnung	Bm&Ar*	Ba*	Fa**
Einheit	mass.-% P		
V1	20,09	77,74	2,17
V2	14,39	52,96	32,65
V3	11,00	100,79	k.A.
V4	8,09	46,15	45,76
V5	15,08	58,61	26,31
V6	10,26	42,38	47,36
V7	7,07	62,80	30,13
V8	4,61	64,86	30,53
V9	11,16	46,97	41,88
V10	6,89	78,05	15,06
V11	6,36	100,81	k.A.
V12	8,56	74,74	16,70
V13	7,34	57,84	34,82
V14	2,97	51,79	45,24
V15	1,51	67,43	31,05
V16	0,10	74,95	24,95
*gemessener Wert			
**berechneter Wert			
k.A. keine Angabe möglich			

Abbildung 51: Phosphorbilanz des Vergasungsversuchs 16 mit Additiven im Hochtemperaturbereich unter Verwendung des Bettmaterials Kalkstein

Dabei weist der Anteil des Phosphors in der Fraktion Bm&Ar einen Wert von 0,10 mass.-% auf. Im Vergleich zum Phosphoranteil des Bettmaterials vor dem Versuch von 0,08 mass.-% ist dies nur eine marginale Erhöhung. Selbst bei der Betrachtung, dass beim Versuch 16 keine Ascherückstände im Bettmaterial vorhanden sind und folglich der gesamte gemessene Phosphor im Bettmaterial ist, würde der Phosphor nur in einem äußerst geringen Ausmaß ins Bettmaterial diffundieren. Diese Annahme gilt für die Bettmaterialien Quarzsand und Kalkstein, wobei für die Betrachtung des Bettmaterials Quarzsand der Versuch 14 herangezogen wurde.

Bei den Verbrennungsversuchen mit Klärschlamp pellets (V9-V12) ist in der Fraktion Fa grundsätzlich ein niedrigerer P Anteil als in den vergleichbaren Versuchen mit Klärschlammgranulat (V1-V4) vorzufinden. Dies liegt am geringeren Flugaschegehalt bei der Verbrennung von Klärschlamp pellets (siehe Tabelle 33). Beim Vergleich der Vergasungsversuche (V5-V8, V13-V16) ist dieser P-Anteil in Summe ähnlicher Größenordnung.

Bei dieser Versuchsreihe kristallisiert sich die Vergasung von Klärschlamp pellets im Hochtemperaturbereich unter Einsatz des Bettmaterials Kalkstein (V16) als effizientestes Verfahren heraus um Phosphor in der Asche zu konzentrieren und die besten Voraussetzungen für eine nachfolgende Abtrennung vom Bettmaterial zu gewährleisten. Es verbleiben ca. 99,9 mass.-% (siehe Tabelle 35) des Phosphors in der Asche, wobei eine Phosphorkonzentration von ca. 5,41 mass.-% gemessen wurde. Die berechnete Phosphatkonzentration der produzierten Aschefraktion liegt mit ca. 12,4 mass.-% im Bereich der meisten Phosphatdünger. Resultierend wäre eine Verwendung der produzierten Asche als Dünger zur Phosphorrückgewinnung, -recycling sinnvoll, sofern die gesetzlichen Voraussetzungen für die Löslichkeit und für die zugelassenen Elementverbindungen erfüllt werden.

Tabelle 36: relevante Parameter/ Analyseergebnisse des Versuchs 16

Bezeichnung	Einheit	P
Elementeintrag durch Klärschlamm	mass.-%	~ 99,9
Entfrachtung	mass.-%	0,0
Klärschlamp pellets	mg/kg TS	18600,06
Konzentration in Fa&Ba	mg/kg TS	54080,8
Kalkstein (vor Versuch)	mg/kg TS	14,795
Konzentration in Bm&Ar	mg/kg TS	34,518
Aschegehalt	mass.-%	34,39
Faktor für die Umrechnung zu P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>1</sup>	1	1/0,436
Phosphatgehalt Klärschlamp pellets*	mass.-%	~ 4,27
Phosphatgehalt Fa&Ba*	mass.-%	~ 12,40
* rechnerisch ermittelt laut DMV (Ö)		

Weiters wird festgehalten, dass eine Vergasung unter den Versuchsbedingungen des Versuchs 16 den verwendeten Klärschlamm hinsichtlich des Phosphorgehaltes so konditioniert, dass eine Verwendung der

<sup>1</sup> <https://www.ris.bka.gv.at/> Anlage 1, II (gelesen am: 21.08.2019)

Klärschlammasche als Edukt des Reco-Phos Prozesses möglich ist. Zusätzlich kann bei einer vorgeschalteten Vergasung des Klärschlammes ein Produktgas erzeugt und genutzt werden. In Kapitel 7.3 werden Grundfließbilder angeführt, die eine Möglichkeit der Integration einer Phosphorrückgewinnung in die bestehenden Strukturen eines Zementwerks darstellen.

Zusammenfassend kann für die Beantwortung der Forschungsfragen, welche Art der thermischen Umwandlung von Klärschlamm die bestmöglichen Voraussetzungen für die Phosphorrückgewinnung aus der erzeugten Klärschlammaschen schafft folgendes festgehalten werden: Die durchgeführte Versuchsreihe zeigt bei allen Versuchen eine effiziente Konzentrierung des Phosphors in der Asche. Als limitierender Faktor wird hierbei die Aschegeometrie gesehen, da diese maßgebenden Einfluss auf die Abtrennung der Asche vom Bettmaterial besitzt. Bei der Verwendung von Klärschlamm pellets als Edukt erfolgte grundsätzlich eine effizientere Abtrennung vom Bettmaterial, da diese Aschen optimalere geometrische Eigenschaften aufweisen. Weiters konnte bei den Vergasungsversuchen eine effizientere Abtrennung erzielt werden. Der Flugaschegehalt bei den Verbrennungsversuchen von Klärschlamm pellets ist grundsätzlich geringer als bei den vergleichbaren Verbrennungsversuchen mit Klärschlamm granulat. Bei den Vergasungsversuchen ist dieser Anteil ähnlicher Größenordnung.

## 7.2 Schwermetalle

Um zu beantworten inwiefern Schwermetalle mit einem Wirbelschichtverfahren aus der Asche abgetrennt werden können bzw. welche Auswirkungen das Additiv  $\text{CaCl}_2$  auf die Schwermetallentfrachtung hat, werden die beiden Vergasungsversuche 8 und 16 gegenübergestellt. Dies erfolgt aufgrund der Tatsache, dass beim Versuch 16 hinsichtlich des Phosphors die besten Ergebnisse erzielt und in Summe die höchste Schwermetallentfrachtung erreicht wurde. Der Versuch 8 weist dieselben Prozessparameter nur ohne dem Additiv  $\text{CaCl}_2$  auf. In Tabelle 37 werden die Analysenergebnisse ausgewählter Schwermetalle der Versuche 8 und 16 angeführt und mit den länderspezifischen Grenzwerten gegenübergestellt. Teilweise konnten die Konzentrationen nicht eindeutig bestimmt werden, da diese unterhalb der Nachweisbarkeitsgrenze liegen. Die Ergebnisse zur Entfrachtung der ausgewählten Elemente werden anschließend in Tabelle 38 dargestellt.

Tabelle 37: Gegenüberstellung der gemessenen Konzentrationen ausgewählter Elemente der Versuche 8 und 16 mit den länderspezifischen Grenzwerten für Österreich und Deutschland

Bezeichnung	gemessene Konzentrationen							Grenzwerte	
	Bettmaterial	Versuch 8 (ohne $\text{CaCl}_2$ )			V16 (mit $\text{CaCl}_2$ )				
		Kalkstein	KS-Granulat	Fa&Ba	Bm&Ar	KS-Pellets	Fa&Ba	Bm&Ar	Ö
<b>Einheit</b>	mg/kg TS								
<b>Pb</b>	<7,1332	<7,1869	<7,5377	<7,3222	61,14	<7,0779	<0,6858	100	150
<b>Zn</b>	11,38	777,19	2438,3	457,73	749,16	679,3	<16,6558	m.A.	4000
<b>Cu</b>	<0,5095	300,58	940,04	210,42	290,07	583,4	1,362		900
<b>Sn</b>	<2,5985	36,399	15,284	183,744	33,238	16,984	<2,4984	Kein Grenzwert	
<b>Cr ges.</b>	<7,1332	59,2	221,34	79,24	60,04	741,42	<0,6858	-	-
<b>Cd</b>	0,498	0,926	<0,3230	0,44	0,935	<0,3033	<0,2939	3 75**	1,5 50**
<b>Hg</b>	0,108	0,835	0,15	<0,0523	1,215	<0,0506	<0,0490	1	1
<b>Ni</b>	<23,4375	46,98	172,3	50,78	45,3	236,32	<2,2534	100	80
<b>Mo</b>	0,652	7,318	15,879	7,998	6,653	16,923	<3,1842	-	-
<b>V</b>	<52,9891	16,97	25,28	7,998	17,28	53,17	<5,0947	- 1500**	-
<b>As</b>	<0,5095	<0,5133	<0,5384	23,092	<0,4924	0,919	<0,4899	40	40
<b>Tl</b>	<4,8404	<4,8768	<5,1149	<4,9686	<4,6783	<4,8028	<4,6538	-	1
hierbei wurden die Mittelwerte der Versuchsergebnisse dargestellt, die Standardabweichungen werden in der Tabelle im Anhang angegeben									
m.A. maximale Aufwandmasse (g/ha) von Schwermetallfrachten auf landwirtschaftliche Nutzflächen									
-nur Kennzeichnung ab Mindestgehalt laut DMV notwendig									
*Bei V10 höhere Entfrachtung									
**Düngemittel mit mehr als 5% $\text{P}_2\text{O}_5$									

Bei der Gegenüberstellung der Analysenergebnisse konnte festgestellt werden, dass das Klärschlammgranulat alle österreichischen Grenzwerte und bis auf die Unsicherheit beim Element Thallium die deutschen Grenzwerte eingehalten werden. Diese Unsicherheit, ob der deutsche Grenzwert (1 mg/kg TS) beim Element Thallium eingehalten wird ist dem Umstand geschuldet, dass die Nachweisbarkeitsgrenzen bei den Analysenergebnissen zwischen 4,6 – 5,1 mg/kg TS liegen. Somit kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Thalliumkonzentrationen den deutschen Grenzwert übersteigen. Bei der Fraktion Fa&Ba des Versuches 8 konnte der Grenzwert (D) von Cu und die Grenzwerte (Ö,D) von Ni nicht eingehalten werden. Bei den Klärschlamm pellets übersteigt die Konzentration des Quecksilbers nur geringfügig die Grenzwerte (Ö,D). Bei der Fa&Ba des Versuchs 16 wurden die Grenzwerte (Ö,D) von Ni ebenfalls überschritten, da es zu einem Fremdeintrag durch Anlagenverschleiß kam. Resultierend können aufgrund der Ergebnisse der angewandten Messmethode nur die Grenzwerte in Österreich beim Edukt Klärschlammgranulat eingehalten werden.

### **Entfrachtung aus dem Prozess**

In der Tabelle 38 werden die Ergebnisse der Entfrachtung ausgewählter Elemente der Vergasungsversuche 8 und 16 gegenübergestellt, um einerseits darzustellen, ob und in welchem Ausmaß Schwermetalle durch ein Wirbelschichtverfahren entfrachtet werden können (vgl. Versuch 8) und andererseits die Auswirkung des Additivs  $\text{CaCl}_2$  auf die Entfrachtung aus dem Prozess über das Abgas (vgl. Versuch 16) aufzuzeigen. Weiters wird die Entfrachtung laut Literatur aus einem vergleichbaren Verbrennungsversuch im Drehrohrofen angegeben. Die Elementeinträge durch die Edukte Klärschlammgranulat und Klärschlamm pellets in den Prozess werden ebenfalls dargestellt, um deren Größenordnung anzuführen. Der Differenzbetrag wurde durch das Bettmaterial eingebracht, wobei dieser teilweise einen signifikanten Anteil ausmacht. Veranschaulicht wird dies beim Versuch 16 bei dem Element Cd. Dabei wurden 34,6 mass.-% durch das Bettmaterial in den Prozess eingebracht. Der Elementeintrag durch die Edukte würde zwar aufgrund der Förderung der Edukte in die Versuchsanlage mit fortschreitender Prozessdauer steigen, jedoch wäre für die Auswertung der Entfrachtung eine höhere Elementkonzentration im Edukt sinnvoll.

Bei den Elementen Pb (V8), As (V8,16), Tl (V8,16) war die Konzentration im Edukt unterhalb der Nachweisbarkeitsgrenze, jedoch wurde teilweise bei Versuchen mit Klärschlammgranulat eine Pb Konzentrationen von bis zu 223 ppm in der Asche gemessen. Dies lässt darauf schließen, dass in der Ausgangsprobe ebenfalls Blei vorhanden ist und bei Versuchen ohne  $\text{CaCl}_2$  angereichert wurden. Bei den Aschen der meisten Versuche konnte ebenfalls As nachgewiesen werden. Da keine andere Arsenquelle identifiziert werden konnte ist davon auszugehen, dass As in den Edukten enthalten ist. Weiters konnte nur im Bettmaterial Quarzsand eine Tl Konzentration ermittelt werden, in den Aschen der Versuche lag diese unter der Nachweisbarkeitsgrenze.

Tabelle 38: Gegenüberstellung der Vergasungsversuche 8 und 16 hinsichtlich der Schwermetallentfrachtung mit den Entfrachtungsergebnissen der Literatur

Bezeichnung	Elementeintrag durch		Entfrachtung aus der stationären Wirbelschicht über das Abgas		Entfrachtung aus dem Drehrohrofen laut Literatur**
	KS-Granulat, V8	KS-Pellets, V16	V 8 (ohne CaCl <sub>2</sub> )	V 16 (mit CaCl <sub>2</sub> )	KS-Asche
Einheit	mass.-%				
Pb	k.A.	>89,6	k.A.	>95,4	>90
Zn	99,6	98,5	15,7	68,7 (±0,3)	>90
Sn	>98,1	>92,8	13,5 (±0,4)	81,0 (±1,4)	>70
Cu	>99,9	>99,8	13,88 (±0,02)	30,7*	>90
Cr ges.	>96,8	>89,4	keine	/	kaum
Cd	87,2	65,4	90,0 (±1,8)	>81,2	>90
Hg	96,6	91,9	95,4 (±0,2)	>96,6	-
Ni	>88,0	>66,0	≤7,7	/	kaum
Mo	97,6	91,1	32,6	≤20,3	>70
V	>54,0	>24,7	≤45,43	≤73,9	-
As	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	kaum
Tl	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	-
k.A. keine Angabe möglich, da Gehalt unterhalb der Nachweisgrenze liegen					
*Bei V10 (Verbrennung) höhere Entfrachtung mit 50,17 mass.-%					
/ konnte nicht ermittelt werden aufgrund Fremdeintrag durch Anlagenverschleiß					
**Kapitel 2.7.2, Verbrennung im Drehrohrofen bei 1000°C, ca. 20min Verweilzeit, MgCl <sub>2</sub> , 5-10 mass.-%Cl in Asche					

Bei einigen Elementen konnte der Elementeintrag durch das Bettmaterial nicht eindeutig ermittelt werden, da die Konzentration im Bettmaterial unterhalb der Nachweisbarkeitsgrenze liegt. Resultierend wurden diese Werte in einem Bereich angegeben. Bei der Entfrachtung aus dem Prozess über das Abgas erfolgte dies analog.

Hinsichtlich der Forschungsfrage kann festgehalten werden, dass die Schwermetalle Zn, Cu, Sn und Mo unter den Prozessbedingungen des Versuches 8 mit einem Wirbelschichtverfahren geringfügig entfrachtet werden können. Ein Vergleich der Schwermetallentfrachtung der beiden Versuche 8 und 16 zeigt, dass die Elemente Zn, Cu und Sn bei der Zugabe von CaCl<sub>2</sub> in einem deutlich höheren Ausmaß entfrachtet werden. Die Elemente Cd und Hg konnten bei beiden Versuchen effizient abgetrennt werden. Als möglicher Grund werden hierbei die Siedetemperaturen (Hg bei 357°C, Cd bei 765°C)<sup>1,2</sup> in Betracht gezogen, da diese unterhalb der Prozesstemperaturen liegen. Folglich wird darauf geschlossen, dass unter den vorliegenden Bedingungen die Elemente Cd und Hg selbst aus komplexen Verbindungen herausgelöst werden. Resultierend steigt die Entfrachtung dieser Elemente mit steigender Temperatur. Die Auswertung der Analysenergebnisse des Elements S ergaben dieselben Erkenntnisse. Der Chlorgehalt in den Produkten wurde nicht messtechnisch erfasst, jedoch wird der zugegebene Chloranteil laut Versuchen des AshDec Verfahrens nach Kapitel 2.7.2

<sup>1</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Quecksilber> (gelesen am: 27.12.2018)

<sup>2</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Cadmium> (gelesen am: 22.10.2019)

ebenfalls zum Großteil in die Gasphase übergeführt.

Das Element Pb konnte durch  $\text{CaCl}_2$  annähernd vollständig entfrachtet werden. Bei Cu konnte durch die Anwendung von  $\text{CaCl}_2$  zwar ein erhöhter Anteil entfrachtet werden, jedoch wurden beim vergleichbaren Verbrennungsversuch 10 ein Entfrachtungsanteil von 50,17 mass.-% ermittelt. Dies könnte auf das in Kapitel 2.7.2 beschriebene Phänomen zurückzuführen sein, wobei Schwermetalle (in diesem Fall Cu) ins Innere des Aschepellets diffundieren.

Chrom wird bei der Betrachtung der Analysenergebnisse bei den Versuchen 1-8 angereichert und verbleibt in der Asche. Bei den Versuchen 9-16 ist eine massive Erhöhung der Chromkonzentration in der Asche zu erkennen. Dies resultiert aus dem Chromeintrag durch den Anlagenverschleiß. Das Reaktormaterial ist ein Chrom-Nickel Stahl (1.4841) mit einer maximalen Chromkonzentration von 26 mass.-% und einer maximalen Nickelkonzentration von 22 mass.-%<sup>1</sup>.



Abbildung 52: chromhaltige Bettmaterialablagerung des Versuchs 16

Für eine spezifischere Betrachtung des Chromgehalts wurde eine Bettmaterialablagerung von Versuch 16 (Abbildung 52) entnommen. Die Ablagerung wurde von der Innenwand der Wirbelschichtapparatur mechanisch abgelöst und die, an der Anlage anliegende Seite (grünlich) mittels REM-EDX analysiert. Es zeigte sich, dass ein signifikanter Anteil an Chrom vorhanden ist. Die erhöhte Chromkonzentration in der Asche bei den Versuchen mit  $\text{CaCl}_2$  (V9-V16) kann durch die Bildung von Chrom(III)-chlorid erklärt werden. Diese Verbindung liegt in fester Form vor und kann laut Literatur aus metallischem Chrom im Chlorstrom bei 600°C synthetisiert werden.<sup>2</sup> Chrom(VI) konnte mit dem eingesetzten Verfahren nicht messtechnisch erfasst werden.

<sup>1</sup> vgl. PRIBYL u. a. 2018

<sup>2</sup> vgl. RIEDEL & JANIÁK 2011, S. 813f



Abbildung 53: Bettmaterialagglomeration  
Versuch 15



Abbildung 54: Agglomeration der  
Brennstoffpellets Versuch 15

In Versuch 15 (bis auf Betrieb im Niedertemperaturbereich gleiche Prozessparameter wie Versuch 16) wurde die höchste Chromkonzentration der gesamten Versuchsreihe mit 1105 ppm im Bettmaterial gemessen. Es zeigte sich, dass der hohe Chromgehalt in Kombination mit dem Bettmaterial Kalkstein einen Einfluss auf den Prozess hat. Es kam zu einer Agglomeration des Bettmaterials in Zusammenhang mit Klärschlammasche, anschließend zur Propfenbildung und Agglomeration der Klärschlamm pellets. Aufgrund der Anlagenverstopfung kam es zu einem schlagartigen Temperaturanstieg und einer kurzzeitigen Versuchstemperatur von ca. 1200°C. Folglich kann als Grund der Agglomeration durch die Bildung chlorhaltiger Verbindungen eine Überschreitung des Ascheschmelzpunktes nicht ausgeschlossen werden. Da beim Versuch 16 ebenfalls eine geringfügige Agglomeration aufgetreten ist (siehe Kapitel 6.4, Abbildung 41) wird davon ausgegangen, dass der hohe Anteil an Chrom sowie die unterstöchiometrische Betriebsweise eine Agglomeration begünstigen.

Analog zu Chrom wird Nickel bei den Versuchen 1-8 angereichert und verbleibt in der Asche. Die hohe Nickelkonzentration in den Aschen der Versuche mit  $\text{CaCl}_2$  ist ebenfalls durch den Anlagenverschleiß sowie diverse chemische Reaktionen zu erklären. Hierbei wird darauf geschlossen, dass feste Nickelchloride unter den vorliegenden Bedingungen gebildet wurden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Versuch 16 bis auf das Element Cu die höchste Schwermetallentfrachtung aufweist. Es kam bei den Versuchen 9-16 zum Fremdeintrag durch die Versuchsanlage von Cr und Ni, wodurch hierbei keine sinnvolle Auswertung über Entfrachtung oder Anreicherung möglich war. Die Entfrachtung von Mn, K, Co, Fe und Na konnte ebenfalls nicht eindeutig festgestellt werden. Laut Literatur werden die Elemente Mn, K, Fe und Na bei den Prozessbedingungen des AshDec Verfahrens nach Kapitel 2.7.2 teilweise in die Gasphase übergeführt. Bei den Elementen Ni (V8), Mo (V16) und V (V8, V16) konnten aufgrund der Konzentrationen der Fraktionen unterhalb der Nachweisbarkeitsgrenzen (siehe Tabelle 37) nur die maximal mögliche Entfrachtung angegeben werden.

Ein Vergleich des Vergasungsversuchs 16 in der stationären Wirbelschichtanlage mit dem Verbrennungsversuch im Drehrohrofen laut Kapitel 2.7.2 zeigt, dass bei den Elementen Pb, Sn und Cd eine ähnliche Entfrachtung stattgefunden hat. Beim Versuch 16 kam es bei Zn zu einer etwas geringeren, bei Cu und Mo zu einer erheblich niedrigeren Entfrachtung.

Grundsätzlich hat die Betrachtung aller Versuche hinsichtlich der Schwermetallentfrachtung ergeben, dass bei steigender Temperatur, Zugabe von chlorhaltigen Additiven, der Betriebsart Luftvergasung unter Verwendung des Bettmaterials Kalkstein eine Erhöhung der Entfrachtung bewirken. Den meisten Einfluss auf die Schwermetallentfrachtung haben dabei die Additive, wobei davon auszugehen ist, dass die Entfrachtung mit steigendem Chlorgehalt ebenfalls steigt.

### 7.3 Mögliche Integration der Phosphorrückgewinnung in die bestehenden Strukturen eines Zementwerks sowie dessen Rentabilität

Die gestellte Forschungsfrage, wie die Integration der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm in die bestehenden Strukturen eines Zementwerks bestmöglich realisiert wird, kann aufgrund der gesammelten Erkenntnisse aus der Literatur und den Ergebnissen dieser Versuchsreihe nicht eindeutig beantwortet werden. Dies resultiert aus der Tatsache, dass hinsichtlich der Schwermetallentfrachtung sowie thermischen Verwertung des Klärschlammes noch Herausforderungen zu bewältigen sind. Es können lediglich die seitens der Literatur und der Versuchsergebnisse als technisch sinnvoll bzw. effizient erachteten Prozessschritte der derzeit möglichen Verwertung des Klärschlammes und der Phosphorrückgewinnung erläutert werden. Darauf aufbauend müssen die gesamten Energieströme des Phosphorrückgewinnungsprozesses, sowie nutzbare Energieströme aus den Prozessstrukturen eines Zementwerks erhoben und eine technisch-ökonomische Analyse durchgeführt werden. Diese Analyse würde jedoch das Ausmaß der vorliegenden Forschungsarbeit übersteigen und folglich werden nur Möglichkeiten der notwendigen Prozessschritte zur Integration der Phosphorrückgewinnung in die bestehenden Strukturen eines Zementwerks in Abbildung 55 und Abbildung 56 angeführt und erläutert.

Die Entwässerung des Klärschlammes findet im Allgemeinen bereits an der Kläranlage in Zentrifugen, Kammerfilterpressen oder Siebbandpressen statt. Letztere wird in der Kläranlage Stockerau eingesetzt, wobei ein Wassergehalt zw. 80-75 mass.-% erreicht wird. Eine weitere Entwässerung am Ort des Anfalls würde zwar die Transportkosten senken, jedoch fehlen vor Ort oft die notwendigen Apparaturen. Um hochkalorische Stützbrennstoffe bei der thermischen Verwertung von Klärschlamm einzusparen ist eine weitere Entwässerung notwendig. Hierbei erscheint eine Bewertung der Nutzbarkeit von Abwärme aus den Prozessen der Zementherstellung zur thermischen Entwässerung sinnvoll. Die anhand der Literatur identifizierten Arten der Trocknung sind die Konvektions- und Kontaktrocknung. Für die Phosphorrückgewinnung und Sterilisation des Klärschlammes ist eine thermische Verwertung zu Klärschlammmasche am effizientesten, sofern im Klärschlamm die gesetzlichen Grenzwerte überschritten werden und eine direkte Ausbringung in die Landwirtschaft oder Kompostierung des Klärschlammes nicht möglich ist. Dabei sollte das Verfahren der Vergasung anstatt der Verbrennung für nähere Betrachtung herangezogen werden, denn im Vergleich zur Verbrennung kann ein energiereiches Produktgas zur weiteren Nutzung bereitgestellt werden. Weiters konnte anhand dieser Versuchsreihe festgestellt werden, dass die Schwermetallentfrachtung bei der Vergasung in Summe effizienter ist. Das Vergasungskonzept der Zweibett-Wirbelschicht-Vergasung wurde bereits an der TU Wien anhand einer 100 kW<sub>th</sub> Pilotanlage erfolgreich getestet. Hinsichtlich der Klärschlammvergasung gibt es noch einige Herausforderungen zu bewältigen, jedoch hat es sich anhand der bisherigen Versuche als vielversprechendes Verfahren zur thermischen Verwertung erwiesen.

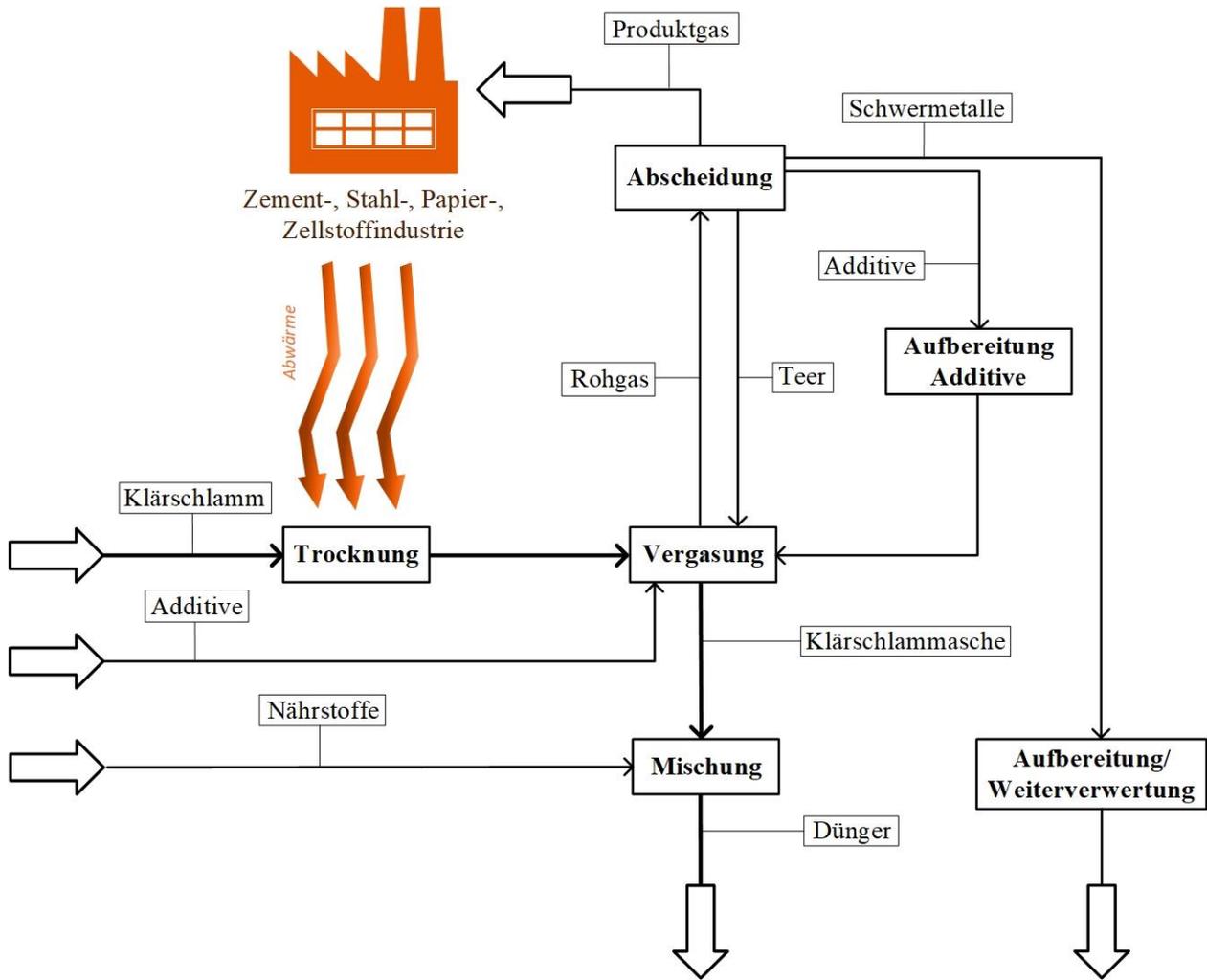


Abbildung 55: Möglichkeit der Integration einer Phosphorrückgewinnung mittels Schwermetallentfrachtung durch Additive in einer Wirbelschichtvergasung

Je nach Art des darauffolgenden Phosphorrückgewinnungsprozesses können Additive zur Schwermetallentfrachtung zugeführt werden (siehe Abbildung 55). Je höher die Chlorkonzentration der Additive, desto besser können schwer entfrachtbare Elemente wie Cr und Ni laut Literatur entfernt werden. Eine erhöhte Chlorkonzentration setzt natürlich eine höhere chemische Beständigkeit der betroffenen Prozessapparaturen voraus, wobei keramische Ausmauerungen sinnvoll erscheinen. Nach darauffolgender Vergasung müssen die Chlor-Schwermetallverbindungen aus dem Produktgas mittels Nasswäscher abgetrennt werden. Das Cl wird recycelt und dem Prozess wieder zugeführt, die ausgefällten Schwermetalle abgetrennt und das Produktgas entweder in der Zementherstellung oder Syntheseprodukterzeugung verwendet. Das Produktgas kann als Brennstoff genutzt werden, um fossile Energieträger einzusparen. Eine Substitution von fossilen Brennstoffen resultiert in einer Kosten- und CO<sub>2</sub> Reduktion der Zementherstellung. Das Cl muss unbedingt vor Produktion eines Syntheseproduktes aus dem Produktgas ausgetragen werden, da es sonst zur Beeinträchtigung der Synthesekatalysatoren kommt. Die Asche kann mit zusätzlichen Nährstoffen wie P, K, Mg, Ca, etc. in einem Mischer vermengt und sofern die gesetzlichen Grenzwerte und Anforderungen an Löslichkeit eingehalten werden, als Düngemittel Anwendung finden.

Die bei der Zementherstellung benötigten mineralischen Rohstoffe, wie z.B. Sand oder Eisenerz werden laut Literatur derzeit teilweise durch den mineralischen Anteil im Klärschlamm ersetzt. Dieser mineralische Anteil steht nicht für die Zementherstellung zur Verfügung, da mit dem getesteten Verfahren in der Wirbelschicht die Asche bei Einhaltung der Grenzwerte direkt als Dünger verwendet wird. Hierbei wäre eine Betrachtung des RecoPhos Prozesses sinnvoll, da Phosphor mit hoher Reinheit hergestellt, sowie eine metallische Fraktion direkt verkauft und die Silikatschlacke der Zementherstellung als mineralischer Anteil zugeführt werden kann.

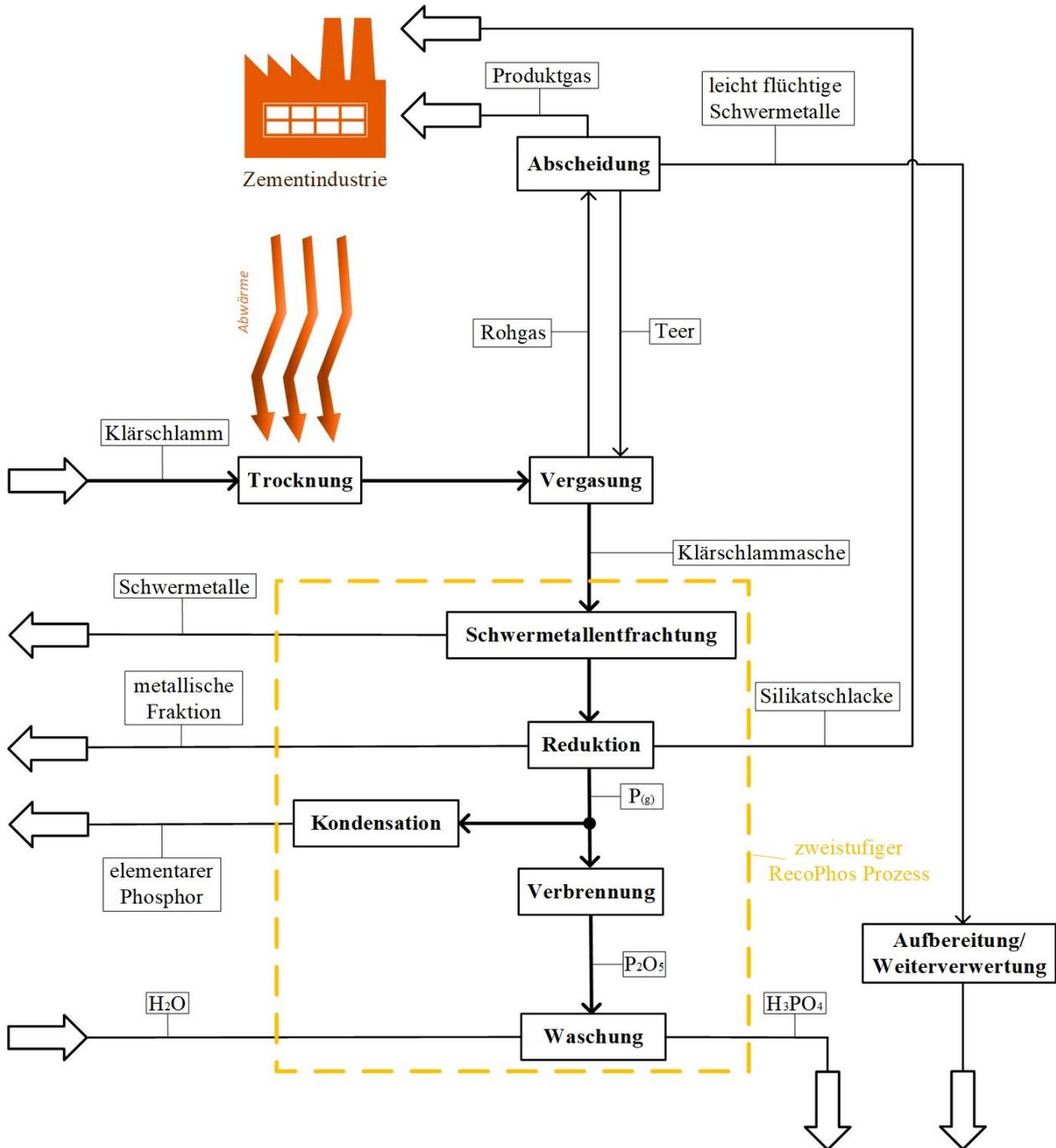


Abbildung 56: Möglichkeit der Integration einer Phosphorrückgewinnung mittels zweistufigen RecoPhos-Prozesses

In Abbildung 56 wird folglich eine weitere Möglichkeit der Integration der Phosphorrückgewinnung mit dem RecoPhos Prozess erläutert, die anhand der Literaturergebnisse ausgearbeitet wurde.

Hierbei kommt es zu keinem Einsatz von Additiven. Nach erfolgter Vergasung werden lediglich die leicht flüchtigen Schwermetalle (vorwiegend Hg und Cd) dem Produktgas entzogen. Die produzierte Asche wird in den Hochtemperatur Flash-Reaktor eingebracht, um Schwermetalle abzuscheiden. Anschließend wird der Phosphor der Klärschlammasche mittels Reduktion gasförmig ausgetragen. Durch eine darauffolgende Kondensation kann entweder elementarer (weißer) Phosphor oder durch weitere Verbrennung mit anschließendem Nasswäscher Phosphorsäure ( $H_3PO_4$ ) hergestellt werden. Nachteilig hierbei ist der zusätzliche Energieaufwand für den induktiv betriebenen Indu-Carb Reaktor des RecoPhos Prozesses in dem die Reduktion stattfindet sowie der Betrieb des Hochtemperatur Flash-Reaktors zur Schwermetallentfrachtung.

Bei der Schwermetallentfrachtung mittels Additiven in der Wirbelschichtvergasung findet kein mineralischer Feststoffeintrag durch den Klärschlamm in den Drehrohrofen der Zementherstellung statt. Weiters ist der Prozess der Phosphorrückgewinnung bis auf die Nutzung der Abwärme zur thermischen Trocknung von den Prozessstrukturen des Zementwerks entkoppelt. Somit könnte diese Möglichkeit der Phosphorrückgewinnung auch in anderen energiereichen Prozessstrukturen wie Papier- und Zellstoffindustrie oder Stahlwerken eingesetzt werden. Als Beispiel sei hier die Papier- und Zellstoffindustrie erwähnt, wobei die Nutzung der Abwärme des Drehrohrofens zur Herstellung von Branntkalk für die thermische Trocknung des mechanisch entwässerten Klärschlammes genutzt werden könnte.

Nichtsdestotrotz gibt es noch einige Herausforderungen in den einzelnen Prozessen der vorgestellten Möglichkeiten der Phosphorrückgewinnung zu bewältigen, einerseits um die Effizienz der einzelnen Prozesse zu erhöhen und andererseits in realen Versuchen die Kompatibilität der nacheinander geschalteten Prozesse nachzuweisen. Die vorgestellten Möglichkeiten sollen die Motivation für zukünftige Forschungsarbeiten liefern, um die in dieser Arbeit behandelten Thematiken weiterzuentwickeln und die kritische Ressource Phosphor einer effizienten Kreislaufnutzung zuzuführen.

## 8 Zusammenfassung

Um Erkenntnisse über die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm zu erlangen, wurde eine Versuchsreihe basierend auf den Erkenntnissen des AshDec Verfahrens im Drehrohrofen durchgeführt. Dieses Verfahren zielt durch die Schwermetallentfrachtung mittels Additive darauf ab, ein phosphorreiches Produkt zu erzeugen, das die Voraussetzungen für Düngemittel erfüllt. Dadurch kann der Phosphor durch die Verwendung als Düngemittel einer Kreislaufnutzung zugeführt werden. Im Zuge dieser Versuchsreihe wurde der Brennstoff Klärschlamm bei unterschiedlichen Prozessparametern in einer Laborwirbelschichtanlage thermisch behandelt. Die Laborwirbelschichtanlage wird als stationäre Wirbelschicht betrieben, wobei zum Zeitpunkt der Versuchsreihe keine Flugascheabscheidung möglich war. Es wurden die Temperatur (Nieder-, Hochtemperaturbereich), das Bettmaterial (Quarzsand, Kalkstein), die Betriebsart (Vergasung, Verbrennung) sowie die Zugabe von Additiven (mit/ohne  $\text{CaCl}_2$ ) variiert. Bei den Versuchen mit Additiven wurde das pulverförmige  $\text{CaCl}_2$  mit dem Klärschlamm pelletiert. Die Variation resultierte in 16 Versuchen und diente dem Erkenntnisgewinn, welche Bedingungen eine Phosphorrückgewinnung begünstigen und welche Auswirkungen auf die Schwermetallentfrachtung entstehen. Die durchgeführte Versuchsreihe hat wie geplant funktioniert und es konnten wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden. Es wurden verschiedene Analysenmethoden verwendet, wobei die ICP-OES Analyse als zweckmäßig hinsichtlich der Auswertung erachtet wurde.

Beim Element Phosphor wird angenommen, dass dies vollständig in den Aschefractionen (Bettasche, Flugasche, Bettmaterial&Ascherückstände) verbleibt und nicht über das Produktgas ausgetragen wird. Diese Annahme wird gestützt durch Literaturergebnisse, wobei Phosphor unter den in der Versuchsreihe gewählten Prozessparametern in kristallinen Aschephase vorliegt. Es wurden die Fraktionen Bettasche sowie Bettmaterial&Ascherückstände analysiert. Dabei wurde festgestellt, dass der Phosphor in der Fraktion Bettasche mehrheitlich konzentriert wurde. Resultierend wird der in der Fraktion Bettmaterial&Ascherückstände vorhandene Phosphoranteil mehrheitlich durch die Ascherückstände geprägt. Bei den Elementen Al, Ca, Mg und Si konnte ebenfalls keine Entfrachtung festgestellt werden. Somit werden diese Elemente ebenfalls in den Aschefractionen konzentriert.

Bei der gesamten Versuchsreihe wurde der Phosphor effizient in der Asche konzentriert, wodurch diese einen Phosphorgehalt erreichen, der handelsüblichen Düngemitteln entspricht. Als limitierender Faktor wird hierbei die Aschegeometrie gesehen, da diese maßgebenden Einfluss auf die Abtrennung der Asche vom Bettmaterial besitzt. Bei der Verwendung von Klärschlamm pellets als Edukt erfolgte grundsätzlich eine effizientere Abtrennung vom Bettmaterial, da diese Aschen optimalere geometrische Eigenschaften aufweisen. Weiters konnte bei den Vergasungsversuchen eine effizientere Abtrennung erzielt werden. Der Flugaschegehalt bei den Verbrennungsversuchen von Klärschlamm pellets ist grundsätzlich geringer als bei den vergleichbaren Verbrennungsversuchen mit Klärschlammgranulat, bei den Vergasungsversuchen ist dieser Anteil ähnlicher Größenordnung.

Der Versuch 16 ergab neben den besten Ergebnissen hinsichtlich des Phosphors in Summe die höchste Schwermetallentfrachtung. Lediglich das Element Cu konnte bei der Verbrennung unter den Prozessbedingungen des Versuchs 10 effizienter entfrachtet werden. Ein Vergleich des Vergasungsversuches 16 in der stationären Wirbelschichtanlage mit dem AshDec Verbrennungsversuch im Drehrohrofen zeigt, dass bei den Elementen Pb, Sn und Cd eine ähnliche Entfrachtung stattgefunden hat. Beim Versuch 16 kam es bei Zn zu einer etwas geringeren, bei Cu und Mo zu einer erheblich niedrigeren Entfrachtung. Resultierend ergab die Auswertung, dass die Elemente Cd, Hg aber auch S und der zugegebene Cl-Anteil mit steigender Temperatur in die Gasphase übergeführt werden. Bei den Elementen Pb, Cu, Mo, Zn, Sn müssen zusätzlich Additive eingesetzt werden, um die Entfrachtung zu steigern.

Die Elemente Cr und Ni wurden bei den Versuchen ohne  $\text{CaCl}_2$  (V1-8) in der Bettasche angereichert. Weiters kam es bei den Versuchen 9-16 zum Fremdeintrag durch die Versuchsanlage von Cr und Ni, wodurch hierbei keine sinnvolle Auswertung über Entfrachtung oder Anreicherung möglich war. Aufgrund des hohen Chlorgehaltes, der mit dem Additiv eingebracht wird, sowie der Betriebsart Vergasung, kommt es zur Bildung von Chromverbindungen, die einen positiven Effekt zugunsten der Agglomeration des Bettmaterials mit Klärschlammasche haben.

Die Entfrachtung von Mn, K, Co, Na und Fe konnte ebenfalls nicht eindeutig festgestellt werden. Laut Literatur gehen die Elemente Mn, K, Na und Fe bei den Prozessbedingungen des AshDec Verfahrens teilweise in die Gasphase über. Grundsätzlich kam es bei einigen Elementen zur Unterschreitung der Nachweisbarkeitsgrenzen (As, Tl), wodurch teilweise keine eindeutige Aussage über die Entfrachtung erfolgen konnte. Resultierend können aufgrund des Fremdeintrags durch Anlagenverschleiß und der Ergebnisse der angewandten Messmethode nur die Grenzwerte in Österreich beim Edukt Klärschlammgranulat eingehalten werden.

In Summe hat die Betrachtung aller Versuche hinsichtlich der Schwermetallentfrachtung ergeben, dass bei steigender Temperatur, Zugabe von chlorhaltigen Additiven, der Betriebsart Luftvergasung unter Verwendung des Bettmaterials Kalkstein eine Erhöhung der Entfrachtung bewirken. Den meisten Einfluss auf die Schwermetallentfrachtung haben dabei die Additive, wobei davon auszugehen ist, dass die Entfrachtung mit steigendem Chlorgehalt ebenfalls steigt. Bei dem Einsatz eines chlorhaltigen Additivs ist bei der eingesetzten Versuchsanlage jedoch mit einem erhöhten Verschleiß zu rechnen.

Die Beantwortung wie die Phosphorrückgewinnung bestmöglich in die bestehenden Strukturen eines Zementwerks integriert werden kann, ist zum derzeitigen Stand nicht möglich. Die Phosphorrückgewinnung hängt von einigen zusammenhängenden Prozessen ab, die in Summe technisch effizient und wirtschaftlich betrieben werden müssen. Folglich sind noch technisch-ökonomische Analysen notwendig, die jedoch das Ausmaß dieser Forschungsarbeit übersteigen. Es werden lediglich zwei Möglichkeiten dargestellt, wie die Phosphorrückgewinnung aus technischer Sicht in die bestehenden Strukturen eines Zementwerks integriert werden können. Für die thermische Verwertung des Klärschlammes wird die Vergasung als zukunftsweisendes Verfahren gesehen, da neben der Produktion der Klärschlammasche auch ein energiereiches Produktgas erzeugt werden kann.

## 9 Ausblick

Als erster Schritt für die Optimierung dieser Versuchsreihe sollte eine geeignete Form der Flugascheabscheidung vorgesehen werden. Dies kann etwa durch die Abscheidung mittels Zyklons in einen separaten Behälter oder der Umbau der Versuchsanlage zu einer zirkulierenden Wirbelschicht erfolgen. Letztere würde die ausgetragene Flugasche und Bettmaterial wieder in den Prozess rückführen. Seitens der Prozessführung sei erwähnt, dass eine Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit bzw. Fluidisierungsgeschwindigkeit bei gleichbleibendem Strömungszustand (blasenbildende Wirbelschicht) den Anteil an Flugasche senken würde. Weiters wäre durch die Befüllung des Vorwärmungsbereiches der Wirbelschichtapparatur mit Bettmaterial bzw. Füllkörpern eine effizientere Luftvorwärmung gewährleistet. Für die Betrachtung des Phänomens (partial heat release) laut Kapitel 2.5 sollte eine Brennstoffzuführung direkt ins Bett erfolgen.

Bei weiteren Versuchen der Schwermetallentfrachtung in einer Wirbelschichtanlage sollten die Schwermetallkonzentrationen im Edukt über der Nachweisbarkeitsgrenze liegen, um detailliertere Erkenntnisse über die Auswirkungen der Variation der Prozessparameter zu erlangen. Gegebenenfalls müssen zu den Brennstoffen Schwermetalle zudosiert werden, um das Phänomen der Entfrachtung besser erfassen zu können. Weiters wäre eine detaillierte Betrachtung der Aschematrix sinnvoll, um die realen Schwermetallverbindungen festzustellen.

In weiterer Folge ist die Variation der zugegebenen Additive ratsam. Es sollten chlorhaltige Additive wie KCl, gasförmige HCl oder Cl<sub>2</sub> für die Schwermetallentfrachtung in der Wirbelschicht untersucht werden. KCl führt laut Literatur zu einer erhöhten Cu Entfrachtung, wobei Ni und Cr bei gasförmiger HCl geringfügig und vorwiegend mit Cl<sub>2</sub> effizient entfrachtet werden können. As kann ebenfalls bei der Verwendung von Cl<sub>2</sub> effizient entfrachtet werden. Weiters ist zukünftig zu klären, ob höhere Konzentrationen von Schwermetallen mit gleichbleibender Cl-Konzentration eine konstante Entfrachtung gewährleisten bzw. welche genauen Auswirkungen differierende Cl-Konzentrationen aufweisen. Die chlorhaltigen Additive sind je nach Konzentration mit einem hohen sicherheitstechnischen Aufwand und ebenfalls konzentrationsabhängigen chemischen Beständigkeit der betroffenen Prozessapparaturen verbunden. Um den dadurch resultierenden Anlagenverschleiß zu minimieren sollte die Versuchsanlage mit einer keramischen Auskleidung ausgestattet werden. Neben der Realisierung der effizienten Entfrachtung mit erhöhter Chlorkonzentrationen sind Versuche mit chlorfreien Alkaliverbindungen wie Natriumsulfit (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) und Natriumhydrogencarbonat (NaHCO<sub>3</sub>) als Additive zur Schwermetallentfrachtung anzudenken. Dies gilt auch für sonstige geeignete reaktive Alkaliverbindungen (Na/K-).

Die Ergebnisse der XRD wurden in dieser Forschungsarbeit nur qualitativ angeführt. Es eignet sich jedoch für die quantitative Bewertung gesetzlich zugelassener Elementverbindungen sowie für eine detaillierte Aufschlüsselung der mineralischen Phasen in den Aschen. Dies wird Aufgabe zukünftiger Forschungsarbeiten sein.

Für die Untersuchung der Schwermetallkonzentration im Produktgas wäre eine Abscheidung mit Waschflaschen sinnvoll. Dabei ist auf das EU-Projekt SUSAN laut 2.7.2 zu verweisen. Zusätzlich sollte eine umfangreiche Gas-, Teeranalyse vorgesehen werden. Für die Einhaltung der Grenzwerte konnten nicht alle relevanten Elemente messtechnisch analysiert werden. Dies trifft auf das Element Chrom(VI) zu, wobei hierfür eine geeignete Analysenmethode eruiert werden muss.

Versuche in der Zweibett-Wirbelschicht-Dampfvergasung könnten ebenfalls interessante Ergebnisse liefern, da Cu bei einer Verbrennung besser entfrachtet wird als bei der Vergasung. Bei diesem Reaktorkonzept arbeitet eine Vergasung mit blasenbildender Wirbelschicht und eine Verbrennung mit transportierender Wirbelschicht.

Hinsicht der Integration der Phosphorrückgewinnung in die bestehenden Strukturen eines Zementwerks (oder eines anderen energieintensiven Prozesses) sind noch detailliertere Betrachtungen der einzelnen Prozessschritte notwendig, um die in dieser Arbeit behandelten Thematiken weiterzuentwickeln und die kritische Ressource Phosphor einer effizienten Kreislaufnutzung zuzuführen.

## Bezeichnungen

Ar	Aschereste
AbfallKlärV	Abfallklärverordnung
AVV	Abfallverbrennungsverordnung
AWG	Abfallwirtschaftsgesetz
Ba	Bettasche
BFB	bubbling fluidized bed
Bio-P	vermehrte biologische Phosphorelimination
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
Bm&Ar	Bettmaterial und Aschereste
D	Deutschland
DFB	dual fluidized bed
ESMA	Elektronenstrahlmikroanalyse
F&E	Forschung und Entwicklung
Fa	Flugasche
Fa&Ba	Flugasche und Bettasche
FFB	fast fluidized bed
FS	Fällschlamm
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry- optische Emissionsspektrometrie mittels induktiv gekoppelten Plasmas
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KS	Klärschlamm
Ö	Österreich
PS	Primärschlamm
PTFE	Polytetrafluorethylen
REM-EDX	Rasterelektronenmikroskop- energy dispersive X-ray spectroscopy
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
RME	Rapsmethylester
RS	Rücklaufschlamm
ÜS	Überschussschlamm
WG	Wassergehalt
XRD	X-Ray diffraction (Röntgendiffraktometrie)

## Symbole

Al	Aluminium	FePO <sub>4</sub>	Eisen(III)-phosphat
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminiumoxid	H	Wasserstoff
AlPO <sub>4</sub>	Aluminiumorthophosphat	H <sub>2</sub>	Wasserstoff
As	Arsen	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Phosphorsäure
C	Kohlenstoff	HCL	Salzsäure
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Ethen	HF	Flusssäure
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Ethan	Hg	Quecksilber
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Propan	HNO <sub>3</sub>	Salpetersäure
Ca	Calcium	K	Kalium
Ca(OH) <sub>2</sub>	Calciumhydroxid	KCl	Kaliumchlorid
Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	Calciumphosphat	Mg	Magnesium
CaCl <sub>2</sub>	Calciumchlorid	MgCl <sub>2</sub>	Magnesiumchlorid
CaCrO <sub>4</sub>	Calciumchromat	Mn	Mangan
CaCrO <sub>4</sub>	Calciumchromat	Mo	Molybdän
CaO	Calciumoxid	N	Stickstoff
CaSiO <sub>3</sub>	Calciumsilikat	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	Natriumsulfit
Cd	Cadmium	NaHCO <sub>3</sub>	Natriumhydrogencarbonat
Cd(OH) <sub>2</sub>	Cadmiumhydroxid	NH <sub>3</sub>	Ammoniak
CdO	Cadmiumoxid	Ni	Nickel
CH <sub>4</sub>	Methan	NiCl <sub>2</sub>	Nickel(II)-chlorid
Cl	Chlor	O	Sauerstoff
Cl <sub>2</sub>	Chlorgas	P	Phosphor
CO	Kohlenmonoxid	P <sub>4</sub>	elementarer (weißer) Phosphor
Co	Kobalt	Pb	Blei
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid	PbO	Bleioxid
Cr	Chrom	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Orthophosphat
Cr(VI)	Chrom(VI)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Diphosphorpentoxid
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Chrom(III)-oxid	S	Schwefel
CrO <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	Chrom(VI)-oxidchlorid	Se	Selen
Cu	Kupfer	Sn	Zinn
CuCl	Kupfer(I)-chlorid	Tl	Thallium
(CuCl) <sub>2</sub>	Kupfer(II)-chlorid	V	Vanadium
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	allgemein Kohlenwasserstoffe	Zn	Zink
Fe	Eisen	ZnCl <sub>2</sub>	Zinkchlorid
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Eisen(III)-oxid		

## Einheiten

%	Prozent, Anteile
°C	Grad Celcius
µm	Mikrometer
g/ha	maximale Aufwandmasse eines Elements pro Hektar
g/m <sup>3</sup> <sub>stp</sub>	Masse pro Kubikmeter, Standardbedingungen
kg/m <sup>3</sup>	Kilogramm pro Kubikmeter
kg <sub>H<sub>2</sub>O</sub> /kg <sub>tr</sub>	Verhältnis von Wasserdampf zu trockenem Brennstoff
kJ/kg <sub>feucht</sub>	Kilojoule bezogen auf die Masse von feuchtem Brennstoff
kW	Kilowatt
kW <sub>th</sub>	Kilowatt, theoretisch
l/min	Liter pro Minute
m/s, cm/s	Meter, Centimeter pro Sekunde
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
mass.-%	Massenprozent
mass.-% <sub>Cl in Asche</sub>	Massenprozent Chlor in Asche
mass.-% <sub>tr</sub>	Massenprozent bezogen auf die Trockensubstanz
mass.-% <sub>tr,af</sub>	Massenprozent bezogen auf die Trockensubstanz, aschefrei
mg/kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Milligramm des jeweiligen Elements pro Kilogramm Diphosphorpentoxid
mg/kg TS, g/kg TS	Milligramm, Gramm des jeweiligen Elements pro Kilogramm Trockensubstanz
min	Minute
MJ/kg <sub>tr</sub>	Megajoule bezogen auf die Masse von trockenem Brennstoff
MW <sub>th</sub>	Megawatt theoretisch
Nm <sup>3</sup> /h	Normkubikmeter pro Stunde
ppm	parts per million, Anteile an Millionen
t TM/a	Tonne Trockenmasse pro Jahr
t TS	Tonnen Trockensubstanz
t/d	Tonnen pro Tag
vol-% <sub>tr</sub>	Volumenprozent bezogen auf Trockengas

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausgewählte Bestandteile von kommunalem Klärschlamm	7
Tabelle 2: Ausgewählte brennstofftechnische Eigenschaften von kommunalem Klärschlamm	8
Tabelle 3: Ausgewählte Inhaltsstoffe von Klärschlamm aus kommunalen Kläranlagen <sup>1,2</sup>	8
Tabelle 4: Arten der Verunreinigungen im Klärschlamm	8
Tabelle 5: Emissionsgrenzwerte für Abfallverbrennung gemäß 17.BImSchV	11
Tabelle 6: Grenzwerte für Schwermetalle laut Düngemittelverordnung (Ö,D)	12
Tabelle 7: Prozessparameter des Vergasungsversuches	24
Tabelle 8: Eigenschaften und fluiddynamische Größen des verwendeten Bettmaterials	25
Tabelle 9: Geometrische, kalorische Eigenschaften; Asche-, Wassergehalt sowie Anteil flüchtige Bestandteile	25
Tabelle 10: Ascheschmelzverhalten nach DIN 51730 <sup>1</sup>	26
Tabelle 11: Hauptelemente, wasserfrei sowie wasser-,aschefrei <sup>1</sup>	26
Tabelle 12: Elemente in der Asche (RFA Analyse), trocken, frei von Kohlenstoff und Sauerstoff	26
Tabelle 13: Hauptgaskomponenten im trockenen Produktgas	27
Tabelle 14: sekundäre Komponenten im trockenen Produktgas <sup>1</sup>	27
Tabelle 15: Anteile von Flugkoks und mineralischem Staub im trockenen Produktgas	27
Tabelle 16: Gravimetrischer Teer und Summe des GCMS (Kopplung eines Gaschromatographie mit einem Massenspektrometer ) gemessenen Teers im trockenem Produktgas <sup>1</sup>	28
Tabelle 17: Teerinhaltsstoffe	28
Tabelle 18: Einteilung der Edukte aus denen der P rückgewonnen wird	29
Tabelle 19: Betriebsparameter der Versuche im EU-Projekt SUSAN	36
Tabelle 20: Erkenntnisse der durchgeführten Versuche	38
Tabelle 21: Ergebnisse der vollumfänglichen Brennstoffanalyse von Klärschlammgranulat	43
Tabelle 22: Ascheschmelzverhalten nach CEN/TS 15370-1	43
Tabelle 23: Ergebnisse der vollumfänglichen Brennstoffanalyse von Klärschlamm pellets	45
Tabelle 24: Ascheschmelzverhalten nach CEN/TS 15370-1	45
Tabelle 25: Zündtemperaturen von ausgewählten technischen Gasen	46
Tabelle 26: Eingesetzte Schutzausrüstung	47
Tabelle 27: Variation der Prozessparameter	49
Tabelle 28: Versuchsmatrix	50
Tabelle 29: Eingestellte Prozessparameter ausgewählter Versuche	54
Tabelle 30: Temperaturbereiche des Bettes bei den Versuchen	63
Tabelle 31: Gemessene Gaszusammensetzung der Verbrennungsversuche	65
Tabelle 32: Gegenüberstellung der Gaskomponenten von Vergasungsversuchen	65
Tabelle 33: Aschegehalte der Versuche	74
Tabelle 34: Ergebnisse der XRD des Edukts Klärschlammgranulat	75
Tabelle 35: P Anteil in den Fraktionen nach den Versuchen	77

Tabelle 36: relevante Parameter/ Analyseergebnisse des Versuchs 16 .....	78
Tabelle 37: Gegenüberstellung der gemessenen Konzentrationen ausgewählter Elemente der Versuche 8 und 16 mit den länderspezifischen Grenzwerten für Österreich und Deutschland.....	80
Tabelle 38: Gegenüberstellung der Vergasungsversuche 8 und 16 hinsichtlich der Schwermetallentfrachtung mit den Entfrachtungsergebnissen der Literatur.....	82

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kläranlage mit anschließender Schlammbehandlung und thermischer Behandlung des Klärschlammes durch (Mono-)Verbrennung.....	5
Abbildung 2: Eigenschaften von Klärschlamm in Abhängigkeit vom Wassergehalt sowie die Entwässerungsverfahren, 95% WG bei 1000 kg, 0% WG bei 50 kg .....	9
Abbildung 3: Zusammensetzung einer Klärschlammasche.....	10
Abbildung 4: Arten der thermischen Verwertung von Klärschlamm.....	14
Abbildung 5: Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen in Deutschland .....	15
Abbildung 6: Wassergehalt, flüchtige Bestandteile (Flüchtige) und Temperaturprofil von Klärschlammteilchen (4-20 mm).....	17
Abbildung 7: Drehofenanlage 4 im Zementwerk Mergelstetten (Auszug aus dem Fließbild).....	21
Abbildung 8: Stufen der Vergasung an einem Klärschlammteilchen als eigenständiger Prozess .....	22
Abbildung 9: 100 kW <sub>th</sub> Vergasungsanlage der TU Wien Stand 2019; Prinzipskizze mit Abmessungen (links), 3D Darstellung der Anlage (mitte), Bild des Verbrennungsreaktors ohne thermische Isolierung (rechts)	23
Abbildung 10: Aufbau des zweistufigen RecoPhos Prozesses (Schwermetallabtrennung mittels Flash-Reaktor und P-Kondensation).....	31
Abbildung 11: AshDec Verfahren.....	33
Abbildung 12: Schema des experimentellen Aufbaus für thermochemische Versuche .....	35
Abbildung 13: Anteil an Schwermetalle in Referenzklärschlammasche (KSA2) in Abhängigkeit der Versuchstemperatur.....	37
Abbildung 14: XRD-Ergebnisse, ausgewählte Mischphasen bei Temperaturen von 350-1050°C, Donator: MgCl <sub>2</sub> , Verweilzeit: 60min.....	38
Abbildung 15: Klärschlammgranulat .....	42
Abbildung 16: Klärschlamm pellets (links); zerkleinerte Pellets nach erfolgter Schneckenförderung (rechts) .....	44
Abbildung 17: Einzelteile der Vollmaske sowie verwendetes Desinfektionsmittel.....	48
Abbildung 18: Desinfektion der Maske und Maskenteile .....	48
Abbildung 19: Kalkstein.....	49
Abbildung 20: Quarzsand.....	49
Abbildung 21: Laborapparatur stationäre Wirbelschicht (links), Schema Laborapparatur (rechts).....	51
Abbildung 22: Steuerstand Gaszufuhr.....	51

Abbildung 23: Fließbild der stationären Wirbelschichtapparatur .....	52
Abbildung 24: Regelung der Heizschalen .....	55
Abbildung 25: Gesiebtes Bettmaterial des Versuchs 8 mit Ascherückständen .....	56
Abbildung 26: Mahlbehälter, -kugel und innenliegende Dichtung der verwendeten Kugelmühle .....	57
Abbildung 27: Temperaturverläufe eines Verbrennungsversuchs (Versuch 1).....	64
Abbildung 28: Verlauf der CO <sub>2</sub> Konzentration während der Aufheizphase im Zuge des Versuchs 16.....	67
Abbildung 29: Strömungszustände in den unterschiedlichen Bereichen der Wirbelschichtlaboranlage....	68
Abbildung 30: Versuch 4.....	70
Abbildung 31: Versuch 12.....	70
Abbildung 32: Versuch 3.....	70
Abbildung 33: Versuch 11.....	70
Abbildung 34: Versuch 2.....	70
Abbildung 35: Versuch 10.....	70
Abbildung 36: Versuch 1.....	70
Abbildung 37: Versuch 9.....	70
Abbildung 38: Klärschlammgranulat .....	70
Abbildung 39: Klärschlamm pellets .....	70
Abbildung 40: Versuch 8.....	71
Abbildung 41: Versuch 16.....	71
Abbildung 42: Versuch 7.....	71
Abbildung 43: Versuch 15.....	71
Abbildung 44: Versuch 6.....	71
Abbildung 45: Versuch 14.....	71
Abbildung 46: Versuch 5.....	71
Abbildung 47: Versuch 13.....	71
Abbildung 48: Klärschlammgranulat .....	71
Abbildung 49: Klärschlamm pellets .....	71
Abbildung 50: Konzentration von Phosphor in den analysierten Fraktionen Bettasche (Ba) und Bettmaterial&Ascherückstände (Bm&Ar) .....	73
Abbildung 51: Phosphorbilanz des Vergasungsversuchs 16 mit Additive im Hochtemperaturbereich unter Verwendung des Bettmaterials Kalkstein.....	77
Abbildung 52: chromhaltige Bettmaterialablagerung des Versuchs 16 .....	83
Abbildung 53: Bettmaterialagglomeration Versuch 15.....	84
Abbildung 54: Agglomeration der Brennstoffpellets Versuch 15 .....	84
Abbildung 55: Möglichkeit der Integration einer Phosphorrückgewinnung mittels Schwermetallentfrachtung durch Additive in einer Wirbelschichtvergasung .....	87
Abbildung 56: Möglichkeit der Integration einer Phosphorrückgewinnung mittels zweistufigen RecoPhos-Prozesses.....	88

## Quellen

17. *BImSchV - Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes* (o. J.): Online verfügbar unter: URL: [https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv\\_17\\_2013/BJNR104400013.html](https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_17_2013/BJNR104400013.html) [16.08.2018]
- AbfKlärV - Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost (2017) Online verfügbar unter: URL: [https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl\\_rv\\_2017/BJNR346510017.html](https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/BJNR346510017.html) [21.08.2019]
- ABWASSERTECHNISCHE VEREINIGUNG (Hrsg.) (1985): *Biologisch-chemische und weitergehende Abwasserreinigung*. (3., überarb. Aufl.). Berlin: Ernst&Sohn
- ABWASSERTECHNISCHE VEREINIGUNG (Hrsg.) (1997): *Biologische und weitergehende Abwasserreinigung*. (4. Aufl.). Berlin: Ernst&Sohn
- ADAM, C, KRÜGER, O (2013, 30. Oktober): *Monitoring von Klärschlammaschen*. Workshop Abwasser-Phosphor-Dünger, Berlin
- ADAM, C., PEPLINSKI, B., KLEY, G., KRATZ, S., SCHICK, J., SCHNUG, E. (2008): Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen – Ergebnisse aus dem EU-Projekt SUSAN. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 60 (3–4), S. 55–64
- BANNICK, Claus-Gerhard, BRANDT, Simone, BERNICKE, Maja, DIENEMANN, Claudia, GAST, Marcus, HOFMEIER, Maximilian, u. a. (2018): *Klärschlamm-entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland*. (S. 104). Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt
- BARTIK, Alexander, BENEDIKT, Florian, FUCHS, Josef, MAUERHOFER, Anna M., HAMMERSCHMID, Martin, MÜLLER, Stefan (2019): *Zweibett-Wirbelschicht-Dampfvergasung von Klärschlamm mit einer Olivin/Kalk-Mischung als Bettmaterial in der 100kWth Pilotanlage an der TU Wien*. Technischer Bericht. (S. 42). Wien: TU Wien Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften
- BAUCH, Jürgen, ROSENKRANZ, Rüdiger (2017): *Physikalische Werkstoffdiagnostik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg Online verfügbar unter: URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-53952-1> [30.12.2018]
- BENEDIKT, Florian, DIEM, Sebastian, PRIBYL, Markus, THELEN, Ferdinand, MÜLLER, Stefan, HOFBAUER, Hermann (2018): *Versuchskampagne 1: Veraschungsversuche von Klärschlamm in einer Laborwirbelschichtanlage*. Technischer Bericht. Wien: TU Wien Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften
- BORGHI, Giorgio, SAROFIM, Adel F., BEÉR, Janos M. (1985): A model of coal devolatilization and combustion in fluidized beds. *Combustion and Flame*, 61 (1), S. 1–16
- BORMANN, Hinnerk, SIEVERS, Michael (2017): Verfahren zur P-Rückgewinnung. In: Markus PORTH, Holger SCHÜTTRUMPF (Hrsg.): *Wasser, Energie und Umwelt* (S. 148–153). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden Online verfügbar unter: URL: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-15922-1\\_20](http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-15922-1_20) [20.04.2018]

- BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (Hrsg.) (2011): *Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2011*. (Bd. 1). Wien
- Cadmium – Wikipedia (o. J.): Online verfügbar unter: URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Cadmium> [22.10.2019]
- CHRISTA, Sebastian (2011): *Optimierung einer stationären Wirbelschichtfeuerung für niederkalorische Brennstoffe*. Wien: TU Wien, Diplomarbeit Online verfügbar unter: URL: <http://katalog.ub.tuwien.ac.at/AC07810264>
- DüMV D (2012) Online verfügbar unter: URL: [http://www.gesetze-im-internet.de/d\\_mv\\_2012/anlage\\_2.html](http://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/anlage_2.html) [21.08.2019]
- DüMV D (2012) Online verfügbar unter: URL: [http://www.gesetze-im-internet.de/d\\_mv\\_2012/anlage\\_1.html](http://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/anlage_1.html) [21.08.2019]
- DüMV Ö (2004) Online verfügbar unter: URL: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20003229> [21.08.2019]
- EGLE, Lukas, AMANN, Arabel, RECHBERGER, Helmut, ZESSNER, Matthias (2016): Phosphor: Eine kritische und zugleich unzureichend genutzte Ressource der Abwasser- und Abfallwirtschaft – Stand des Wissens und Ausblick für Österreich und Europa. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 68 (3–4), S. 118–133
- EGLE, Lukas, RECHBERGER, Helmut, ZESSNER, Matthias (2014a): *Endbericht-Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser*. Wien: TU Wien, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Sektion VII Wasser
- EGLE, Lukas, RECHBERGER, Helmut, ZESSNER, Matthias (2014b): Vergleich von Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 66 (1–2), S. 30–39
- EBLETZBICHLER, Daniel (2017): *Auslegung, Aufbau und Inbetriebnahme einer Wirbelschichtapparatur im Labormaßstab für thermische Umwandlungsprozesse von Biomasse*. Wien: TU Wien, Diplomarbeit Online verfügbar unter: URL: <http://katalog.ub.tuwien.ac.at/AC14466208>
- European Commission (2017): *Study on the review of the list of Critical Raw Material*. (S. 515). Brüssel
- GÖRNER, Klaus, HÜBNER, Kurt (Hrsg.) (2002): *Gewässerschutz und Abwasserbehandlung: mit 126 Tabellen*. Berlin: Springer
- IAT-INGENIEURBERATUNG GMBH (2014): *Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm-Machbarkeitsstudie*. Technischer Bericht. (S. 89). Stuttgart: Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft, iat Ingenieurberatung GmbH
- KALTSCHMITT, Martin, HARTMANN, Hans, HOFBAUER, Hermann (Hrsg.) (2016): *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. (3., aktualisierte und erweiterte Auflage.). Berlin Heidelberg: Springer Vieweg

- KOHL, H., PADOUVAS, E. (2007): *Analysenbericht über die Analyse einer Brennstoffprobe*. Analysenbericht Nr. PL-0742-A. (S. 5). Wien: Prüflabor für Feuerungsanlagen am Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften
- KRÜGER, Oliver, ADAM, Christian (2014): *Monitoring von Klärschlammmonoverbrennungsgaschen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zur Ermittlung ihrer Rohstoffrückgewinnungspotentiale und zur Erstellung von Referenzmaterial für die Überwachungsanalytik*. (UMWELTBUNDESAMT, Hrsg.). Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt
- LECKNER, B., ÅMAND, L.-E., LÜCKE, K., WERTHER, J. (2003): Gaseous emissions from co-combustion of sewage sludge and coal/wood in a fluidized bed. *Fuel*, 83 (4–5), S. 477–486
- LEDERER, Jakob, RECHBERGER, Helmut (2010): Comparative goal-oriented assessment of conventional and alternative sewage sludge treatment options. *Waste Management*, 30 (6), S. 1043–1056
- LINNA, Li, QIANGQIANG, Ren, SHIYUAN, Li, QINGGANG, Lu (2013): Effect of Phosphorus on the Behavior of Potassium during the Co-combustion of Wheat Straw with Municipal Sewage Sludge. *Energy & Fuels*, 27 (10), S. 5923–5930
- MISLEJ, V, BABIC, R, MLAKAR, E., KALCIC, A. (o. J.): *Overview of three years production of sewage sludge from the wastewater treatment plant as an alternative solid fuel*.
- Mohshärte* | *Edelsteinlexikon RENÉSIM* (o. J.): Online verfügbar unter: URL: <https://www.renesim.com/at/de/wissen/edelsteinlexikon/fachbegriffe/mohshaerte> [21.08.2018]
- MONTAG, David, EVERING, Wibke, MALMS, Susanne, PINNEKAMP, Johannes, REINHARDT, Joachim, FEHRENBACH, Horst, u. a. (2014): *Bewertung konkreter Maßnahmen einer weitergehenden Phosphorrückgewinnung aus relevanten Stoffströmen sowie zum effizienten Phosphoreinsatz*. (S. 226). Aachen: Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen Universität
- MONTAG, David Markus, PINNEKAMP, Johannes (2008): *Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserreinigung: Entwicklung eines Verfahrens zur Integration in kommunale Kläranlagen*. Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Siedlungsabfallwirtschaft und Institut für Siedlungswasserwirtschaft
- NEUBAUER, Christian (2019): *Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich*. Statusbericht. (S. 138). Wien: Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus
- NOWAK, B., PESSL, A., ASCHENBRENNER, P., SZENTANNAL, P., MATTENBERGER, H., RECHBERGER, H., u. a. (2010): Heavy metal removal from municipal solid waste fly ash by chlorination and thermal treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 179 (1–3), S. 323–331
- OGADA, Tom, WERTHER, Joachim (1996): Combustion characteristics of wet sludge in a fluidized bed: Release and combustion of the volatiles. *Fuel*, 75 (5), S. 617–626
- OLIVA, Judith, BERNHARDT, Antonia, REISINGER, Hubert, DOMENIG, Manfred, KRAMMER, Hans-Jörg (2009): *Klärschlamm: Materialien zur Abfallwirtschaft*. Klagenfurt: Umweltbundesamt
- PENTHOR, Stefan (2009): *Untersuchung zur Erweiterung des Betriebsbereiches einer stationären Wirbelschichtfeuerung für niedrigkalorische Brennstoffe*. Wien: TU Wien, Diplomarbeit Online verfügbar unter: URL: <http://katalog.ub.tuwien.ac.at/AC07806482>

- PENTHOR, Stefan, HÖLTL, Werner, BAUMGARTINGER, Jürgen, PRÖLL, Tobias, HOFBAUER, Hermann (o. J.):  
Sewage sludge combustion in a 16MWth bubbling fluidized bed using oxygen enriched air., S. 8
- PRIBYL, Markus, SCHMID, Johannes C., MÜLLER, Stefan (2018): *Dokumentation des Anlagenbaus zu einer Wirbelschichtapparatur für hohe Temperaturen im kleinen Labormaßstab*. Technischer Bericht. (S. 18). Wien: TU Wien Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften
- Quecksilber* – Wikipedia (o. J.): Online verfügbar unter: URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Quecksilber> [27.12.2018]
- RIEDEL, Erwin, JANIAK, Christoph (2011): *Anorganische Chemie*. (8. Aufl.). Berlin ; New York: De Gruyter
- Röntgenfluoreszenzanalyse* (o. J.): Online verfügbar unter: URL: <http://www.chemie.de/lexikon/R%C3%B6ntgenfluoreszenzanalyse.html> [07.10.2018]
- RÖSKE, Isolde, UHLMANN, Dietrich (2005): *Biologie der Wasser- und Abwasserbehandlung: 24 Tabellen*. Stuttgart: Ulmer
- SCHABAUER, Andreas (2009): *Co-gasification of sewage sludge and wood in a dual fluidized bed steam gasifier*. Wien: TU Wien, Master Thesis Online verfügbar unter: URL: <http://katalog.ub.tuwien.ac.at/AC07806481>
- SCHMID, Johannes C. (2014): *Development of a novel dual fluidized bed gasification system for increased fuel flexibility*. Wien: TU Wien Online verfügbar unter: URL: <http://katalog.ub.tuwien.ac.at/AC12014941>
- SCHMID, Johannes C., BARTIK, Alexander, BENEDIKT, Florian, MAUERHOFER, Anna M., FUCHS, Josef, SCHANZ, E, u. a. (2019): *Steam gasification of sewage sludge for synthesis processes*. (S. 9). Wien: SMS group Process Technologies GmbH, Energy&Chemical Engineering GmbH, TU Wien Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften
- SCHMID, Johannes C., BENEDIKT, Florian, FUCHS, Josef, MAUERHOFER, Anna Magdalena, MÜLLER, Stefan, HOFBAUER, Hermann (2019): Syngas for biorefineries from thermochemical gasification of lignocellulosic fuels and residues—5 years' experience with an advanced dual fluidized bed gasifier design. *Biomass Conversion and Biorefinery* Online verfügbar unter: URL: <http://link.springer.com/10.1007/s13399-019-00486-2> [14.11.2019]
- SCHMID, Johannes C., WOLFESBERGER, Ute, KOPPATZ, Stefan, PFEIFER, Christoph, HOFBAUER, Hermann (2012): Variation of feedstock in a dual fluidized bed steam gasifier-influence on product gas, tar content, and composition. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 31 (2), S. 205–215
- SCHÖNBERG, Andreas, RAUPENSTRAUCH, Harald (2015): *Vom Klärschlamm zu Phosphor*. Technischer Bericht. (S. 13)
- SCHÖNBERG, Andreas, SAMIEL, Kasra, KERN, Hannes, RAUPENSTRAUCH, Harald (2014): Der RecoPhos-Prozess – Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammasche. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 66 (11–12), S. 403–407

- SCHWENK ZEMENT KG (2014): *Minderung von NO<sub>x</sub>-Emissionen in einer Drehofenanlage der Zementindustrie mittels SCR-Technologie (High-Dust)*. Technischer Bericht Nr. Umt-TB 001/2014/F. (S. 111). Heidenheim-Mergelstetten: Schwenk Zement KG/Forschungsinstitut der Zementindustrie GmbH Online verfügbar unter: URL: [https://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/zement\\_schwenk\\_ab\\_scr\\_high\\_dust\\_2014.pdf](https://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/zement_schwenk_ab_scr_high_dust_2014.pdf) [29.12.2018]
- SEILER, Udo (2010): *Vergleich von Verfahren zur Phosphatgewinnung aus Abwasser und Klärschlämmen*. Technischer Bericht. (S. 19)
- SKOGLUND, Nils (2014): *Ash chemistry and fuel design focusing on combustion of phosphorus-rich biomass*. Umeå: Umeå universitet, Tillämpad fysik och elektronik, Department of applied physics and electronics, Umeå universitet Abgerufen von SwePub (National Library of Sweden).
- SKOGLUND, Nils, GRIMM, Alejandro, ÖHMAN, Marcus, BOSTRÖM, Dan (2014): Combustion of Biosolids in a Bubbling Fluidized Bed, Part 1: Main Ash-Forming Elements and Ash Distribution with a Focus on Phosphorus. *Energy & Fuels*, 28 (2), S. 1183–1190
- STAMMBACH, Marc René (1987): *Untersuchungen zur Pyrolyse von Klärschlamm in der Wirbelschicht*. ETH Zurich Online verfügbar unter: URL: <http://hdl.handle.net/20.500.11850/139279> [29.05.2018]
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2018): *Abwasserbehandlung - Klärschlamm - 2015/2016*. (S. 84) Online verfügbar unter: URL: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Publikationen/Downloads-Wasserwirtschaft/klarschlamm-5322101169004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Publikationen/Downloads-Wasserwirtschaft/klarschlamm-5322101169004.pdf?__blob=publicationFile&v=6) [02.10.2019]
- THELEN, Ferdinand (2018): *Klärschlammveraschung in einer Laborwirbelschichtapparatur*. Wien: TU Wien, Bachelorarbeit
- THOMÉ-KOZMIENSKY, Karl J. (Hrsg.) (1998): *Klärschlamm Entsorgung*. Neuruppin: TK-Verl. Thomé-Kozmiensky Online verfügbar unter: URL: <http://katalog.ub.tuwien.ac.at/AC02301852>
- TONDL, Gregor (2013, Jänner): *Oxyfuel Verbrennung von Klärschlamm*. Wien: TU Wien Online verfügbar unter: URL: <http://katalog.ub.tuwien.ac.at/AC07815054>
- WASSER-WISSEN.DE (o. J.): *Schlammstabilisierung*. Online verfügbar unter: URL: <http://www.wasserwissen.de/> [04.01.2019]
- WERTHER, Joachim, SAENGER, Markus (2000): Emissions from Sewage Sludge Combustion in Germany. Status and Future Trends. *JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING OF JAPAN*, 33 (1), S. 1–11
- WIECHMANN, Benjamin, DIENEMANN, Claudia, KABBE, Christian, BRANDT, Simone, VOGEL, Ines, ROSKOSCH, Andrea (2012): *Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt
- WILK, Veronika, KITZLER, Hannes, KOPPATZ, Stefan, PFEIFER, Christoph, HOFBAUER, Hermann (2011): Gasification of waste wood and bark in a dual fluidized bed steam gasifier. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1 (2), S. 91–97

- WOLFESBERGER, Ute, AIGNER, Isabella, HOFBAUER, Hermann (2009): Tar content and composition in producer gas of fluidized bed gasification of wood-Influence of temperature and pressure. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 28 (3), S. 372–379
- WOLFESBERGER-SCHWABL, Ute (2013): *Profiling tar behavior in dual fluidized bed biomass steam gasification*. Wien: TU Wien Online verfügbar unter: URL: <http://katalog.ub.tuwien.ac.at/AC11451288>
- Wolframcarbide – Wikipedia (o. J.): Online verfügbar unter: URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Wolframcarbide> [21.08.2018]
- Zündtemperaturen von technischen Gasen (o. J.): Online verfügbar unter: URL: [http://www.science-at-home.de/wiki/index.php/Z%C3%BCndtemperaturen\\_von\\_technischen\\_Gasen](http://www.science-at-home.de/wiki/index.php/Z%C3%BCndtemperaturen_von_technischen_Gasen) [25.08.2018]

## Anhang

Diagramme der ICP-OES

Analysenergebnisse ICP-OES

Analysenergebnisse RFA

Analysenberichte REM-EDX

XRD-Analyse Klärschlammgranulat

Temperaturprogramm Aufschluss

Dräger, Richtiges Auswählen von Atemschutzgeräten

## Diagramme der ICP-OES

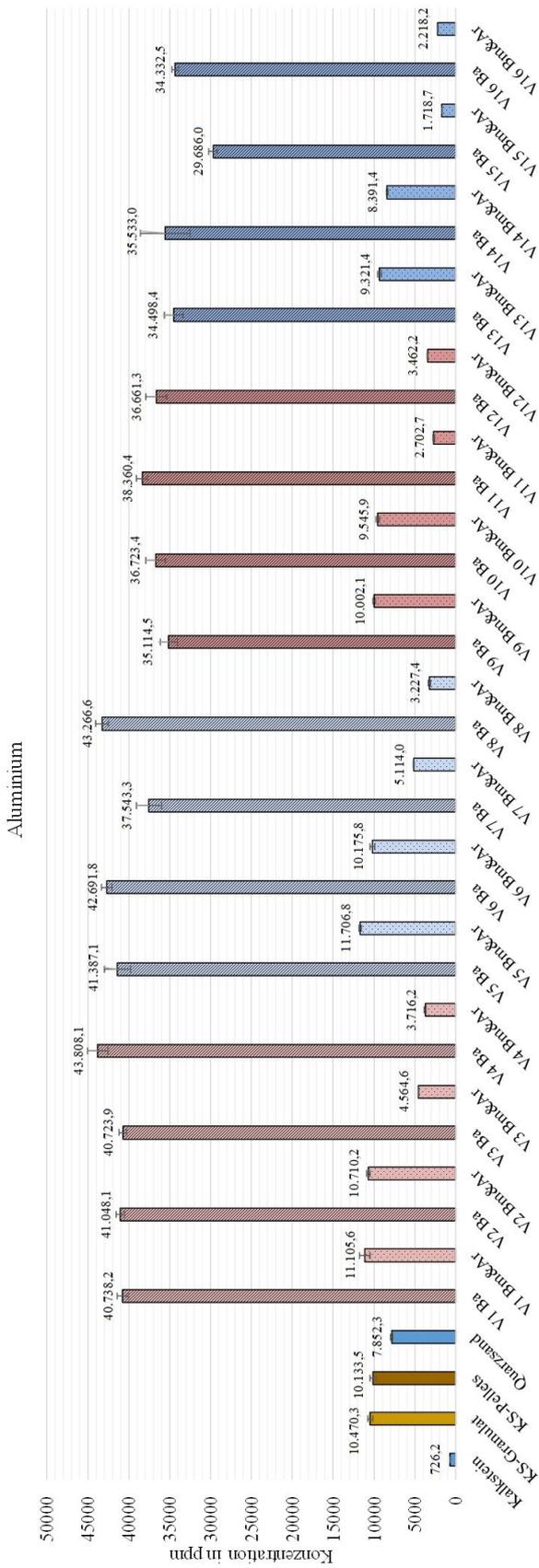


Abbildung 57: Konzentration von Aluminium

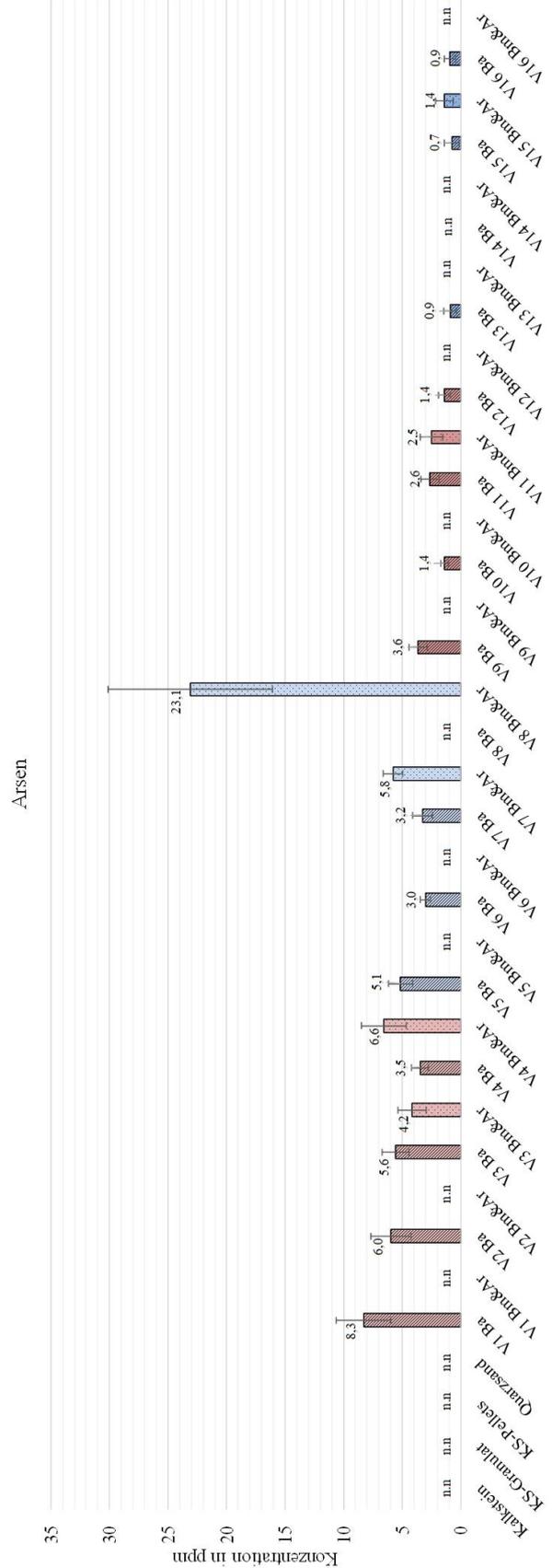


Abbildung 58: Konzentration von Arsen

Blei

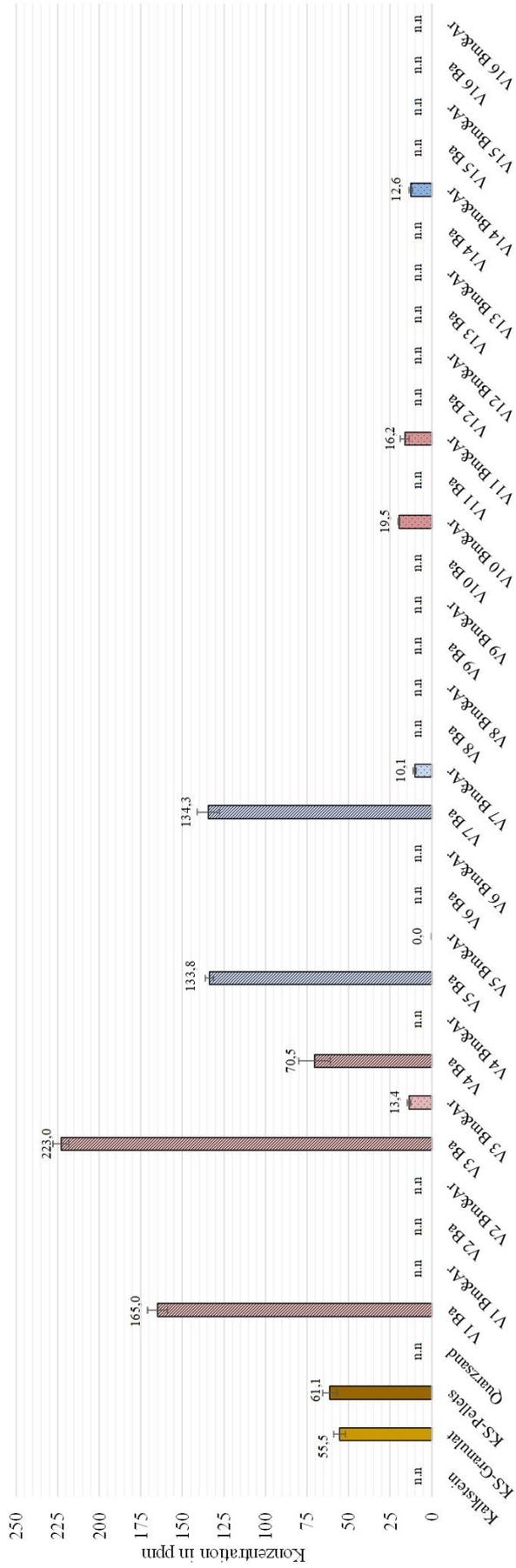


Abbildung 59: Konzentration von Blei

Cadmium

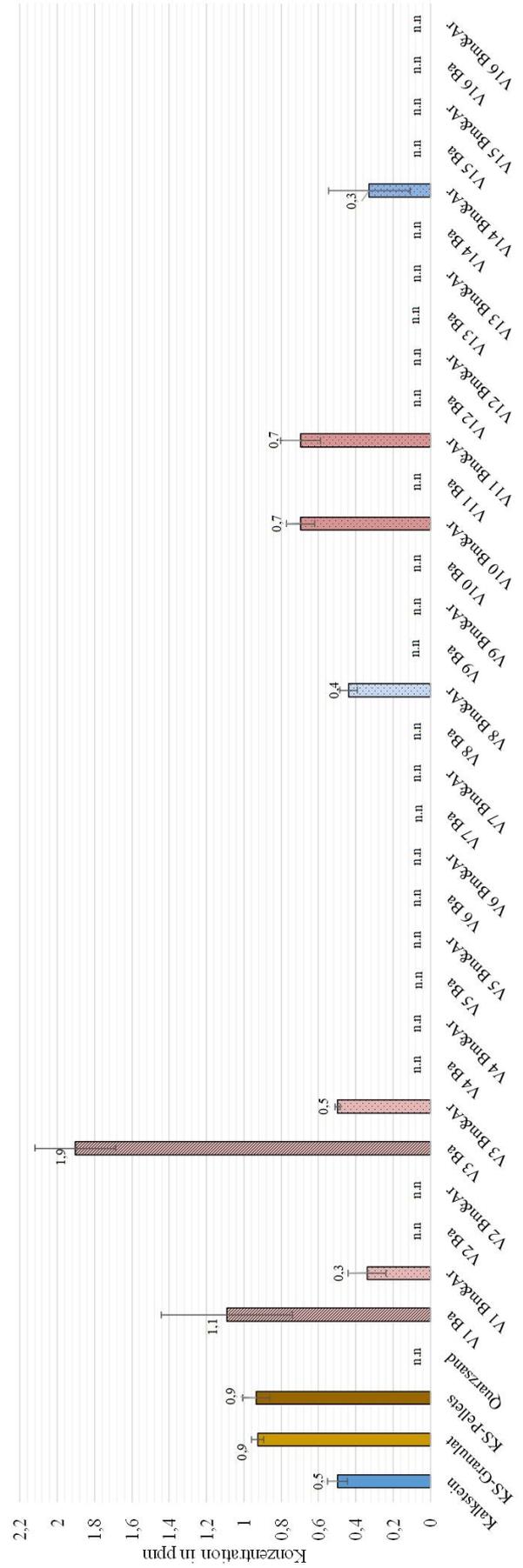


Abbildung 60: Konzentration von Cadmium

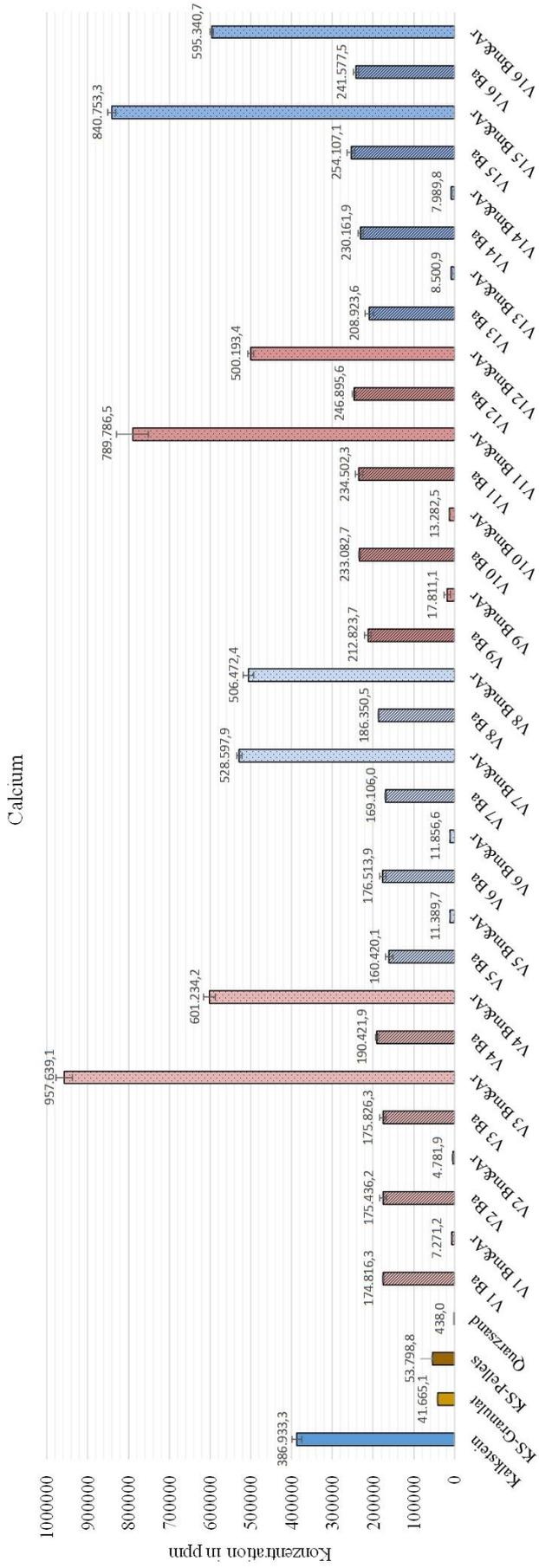


Abbildung 61: Konzentration von Calcium

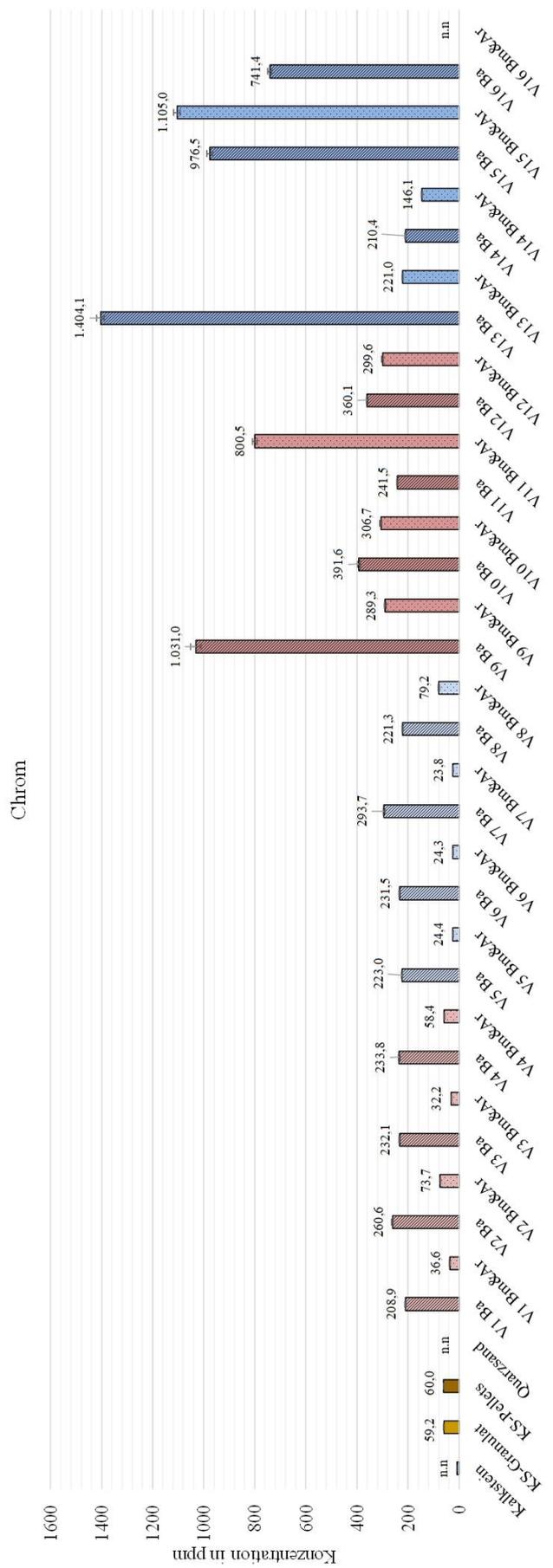


Abbildung 62: Konzentration von Chrom

Cobalt

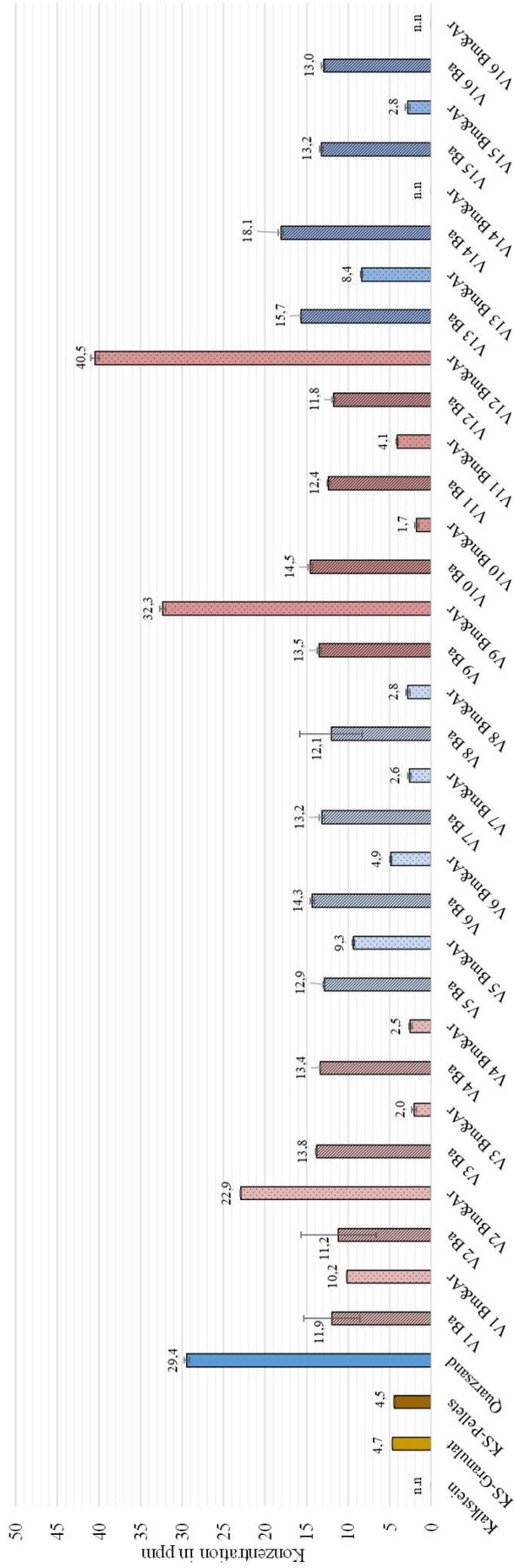


Abbildung 63: Konzentration von Cobalt

Eisen

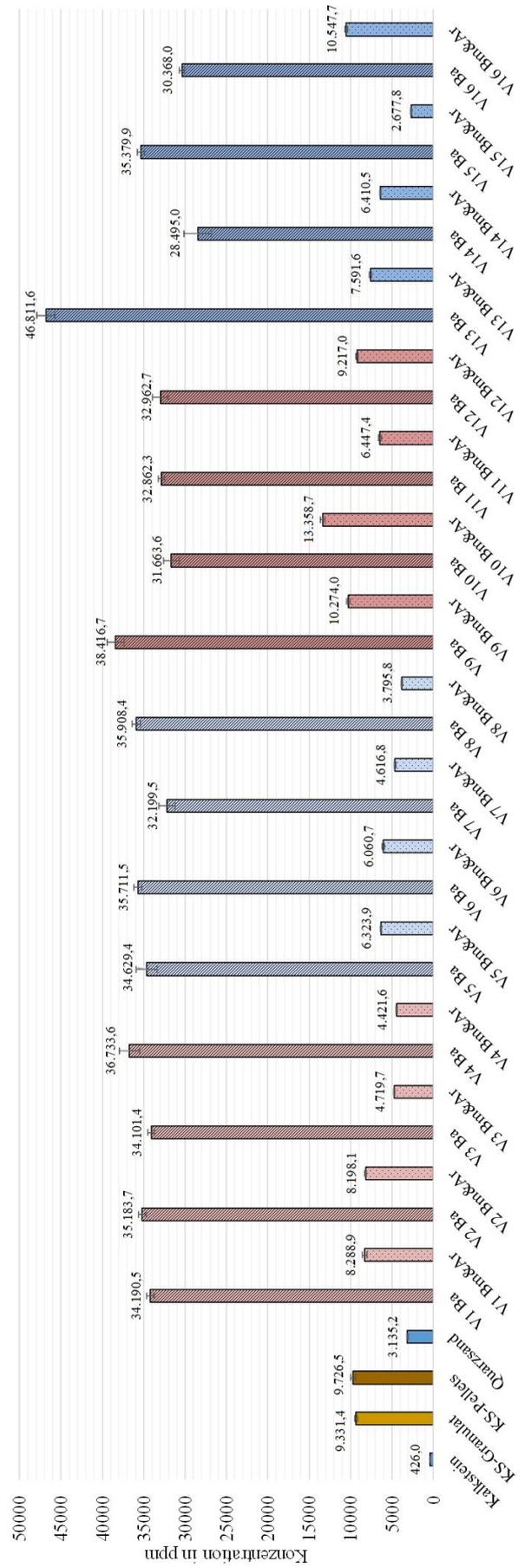


Abbildung 64: Konzentration von Eisen

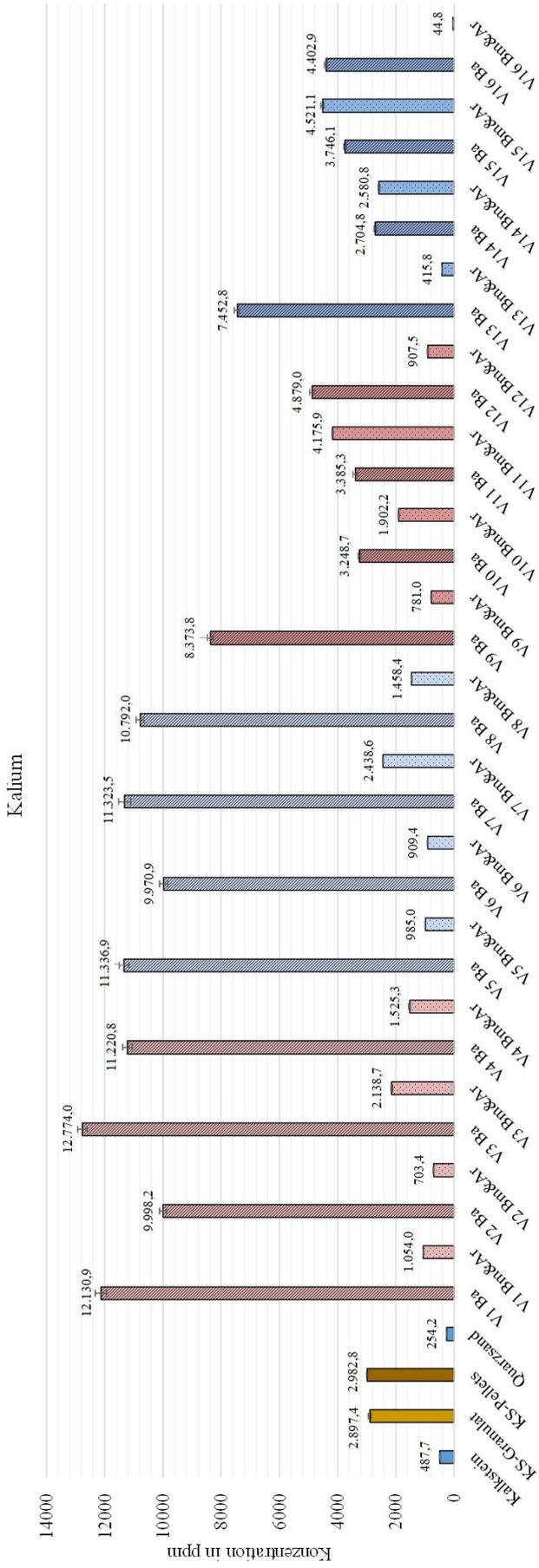


Abbildung 65: Konzentration von Kalium

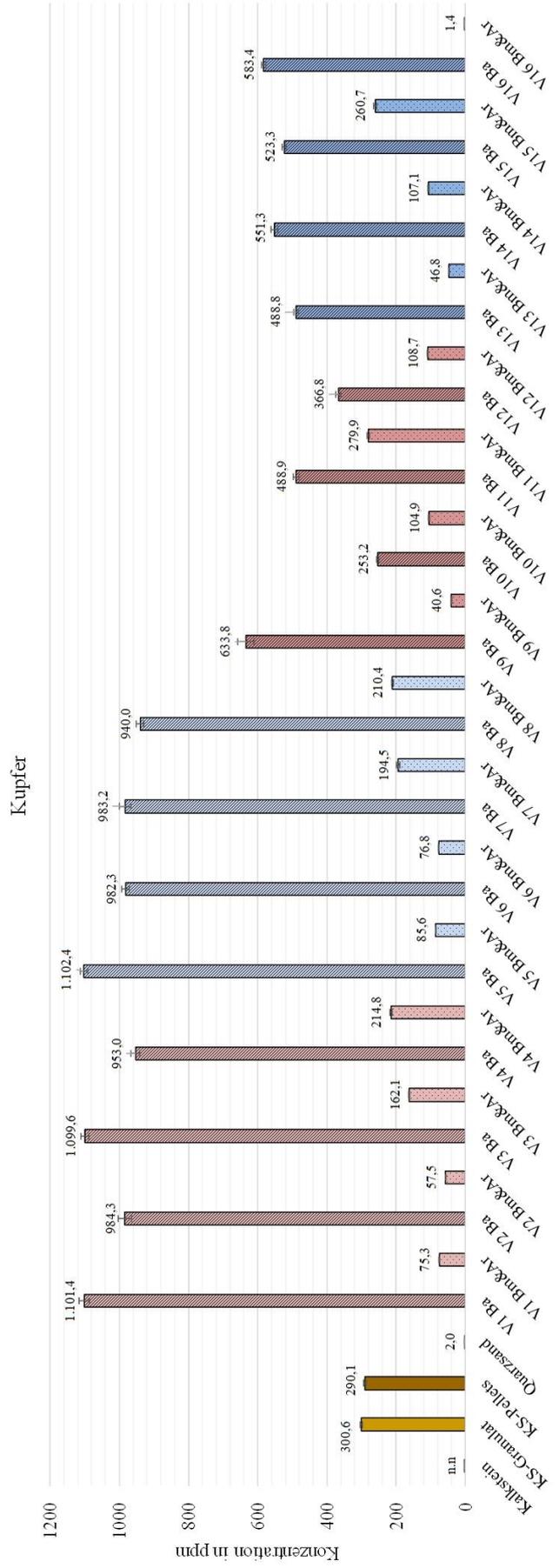


Abbildung 66: Konzentration von Kupfer

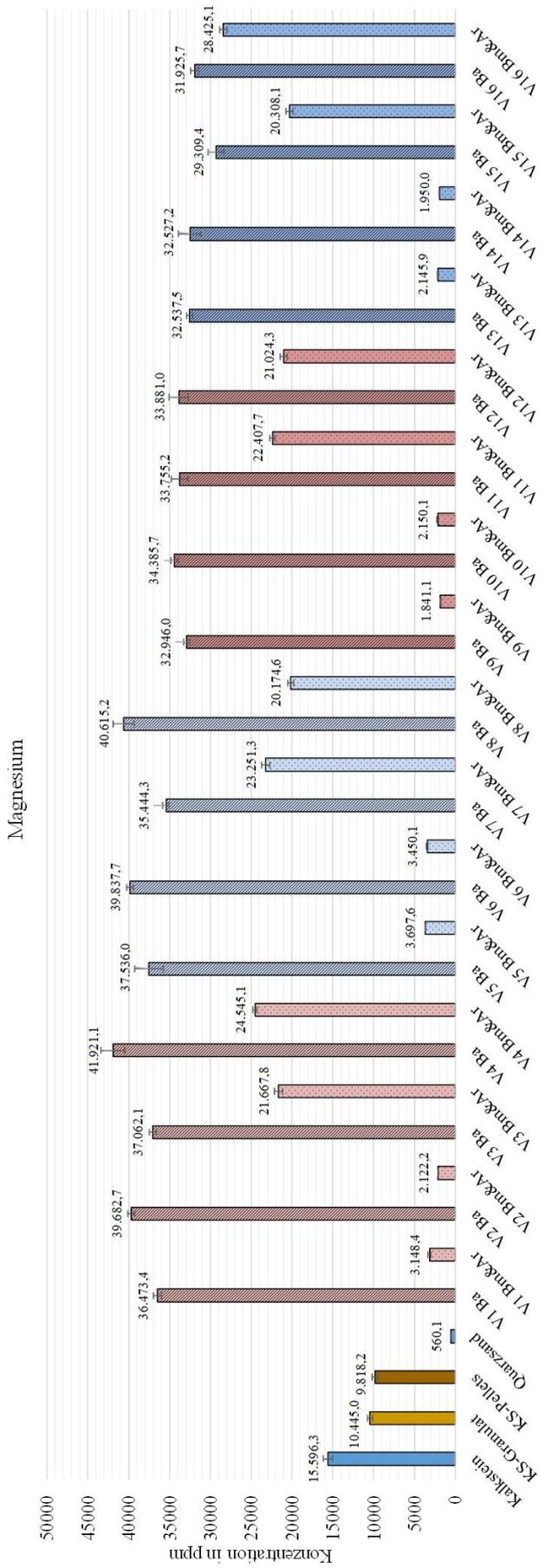


Abbildung 67: Konzentration von Magnesium

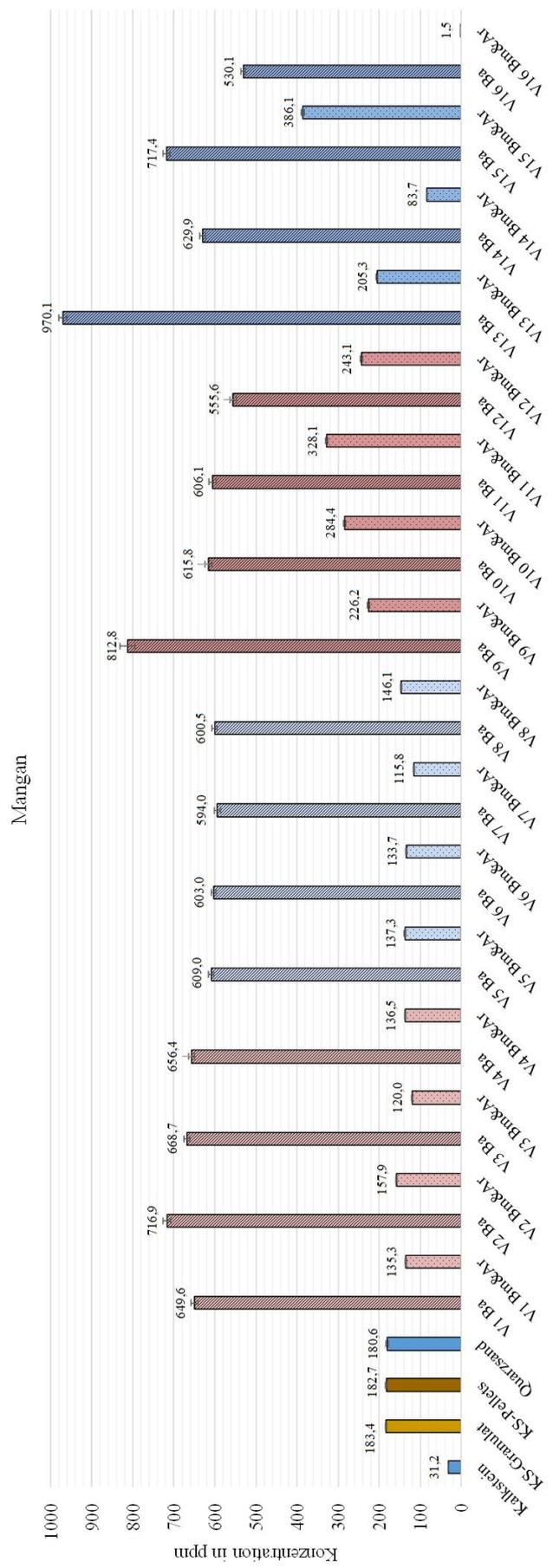


Abbildung 68: Konzentration von Mangan

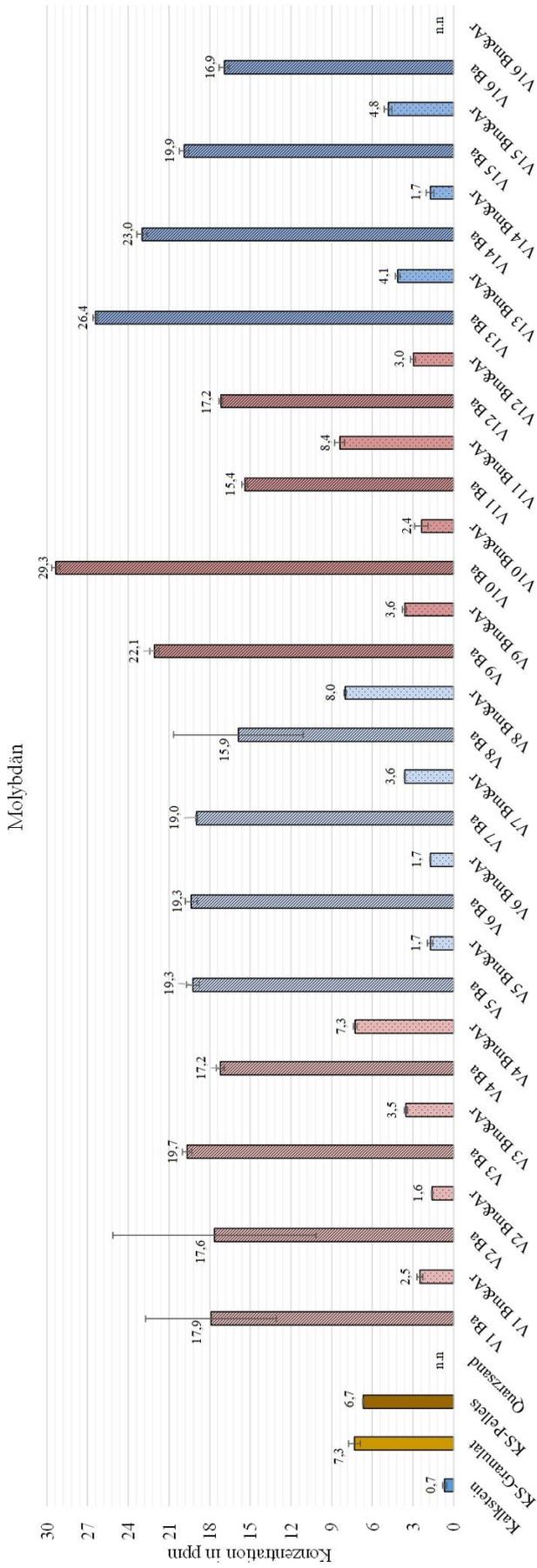


Abbildung 69: Konzentration von Molybdän

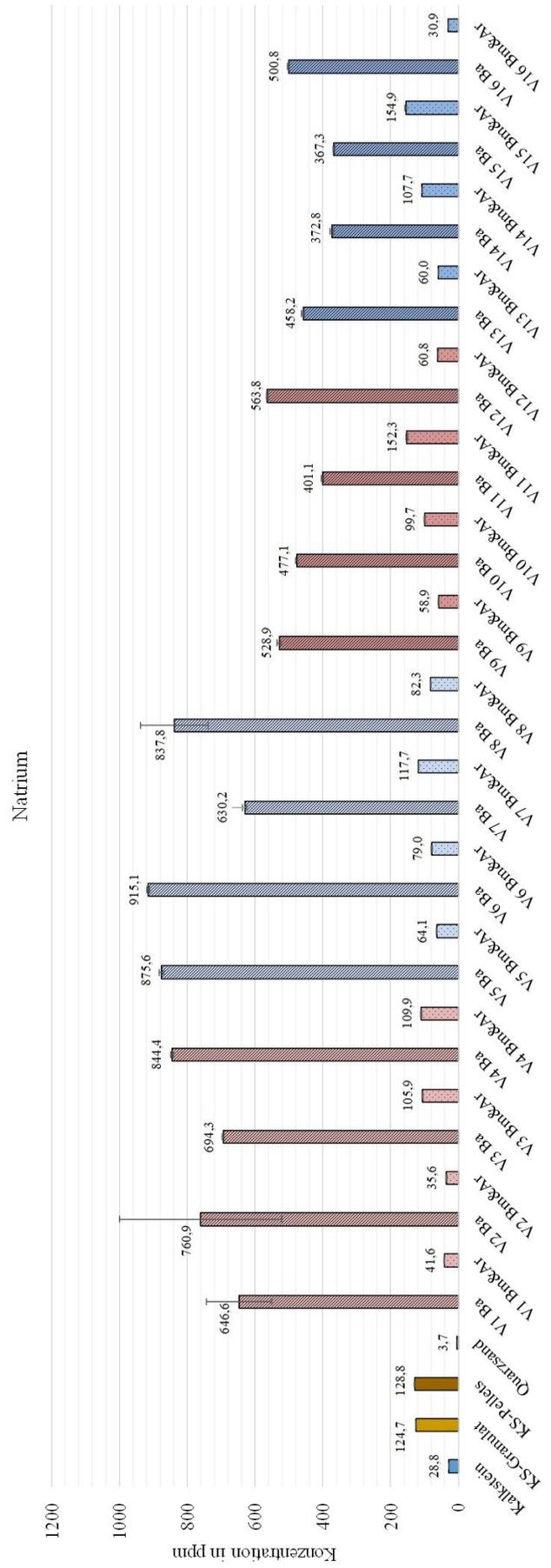


Abbildung 70: Konzentration von Natrium

### Nickel

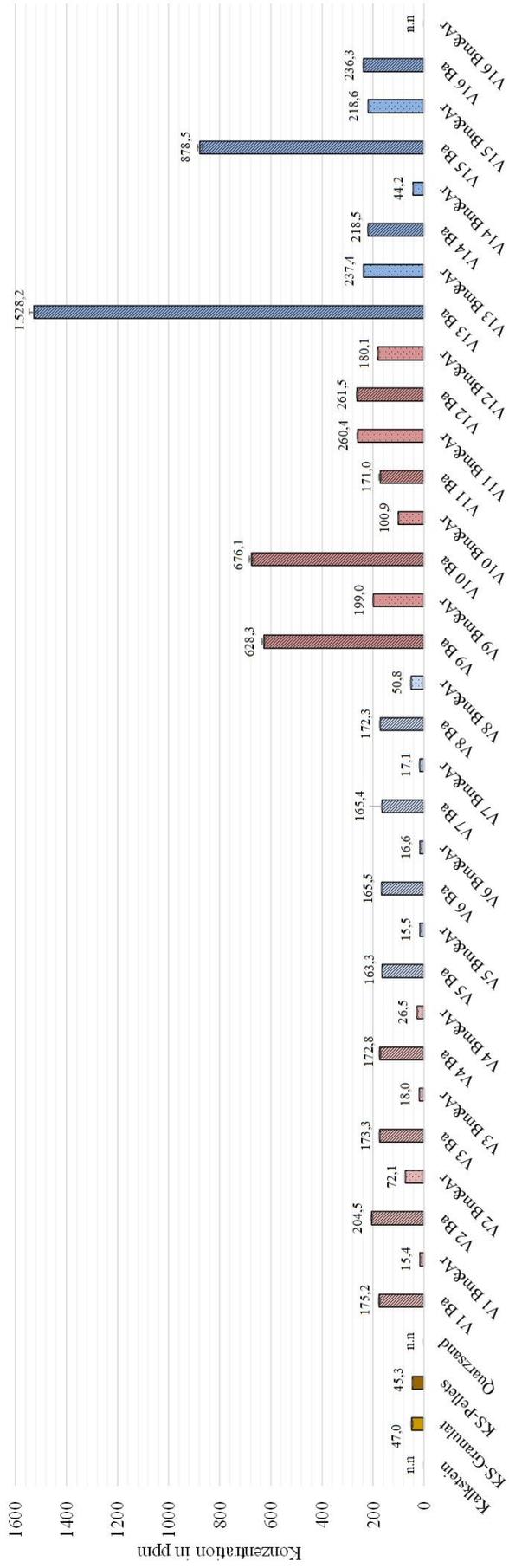


Abbildung 71: Konzentration von Nickel

### Phosphor

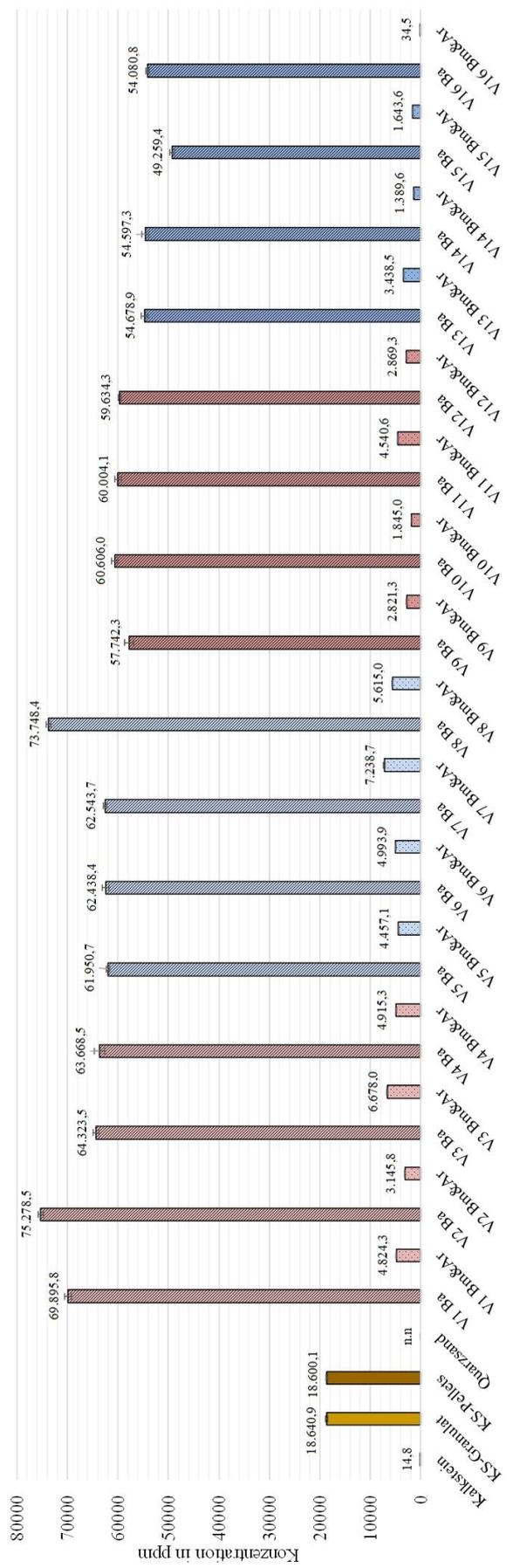


Abbildung 72: Konzentration von Phosphor

Quecksilber

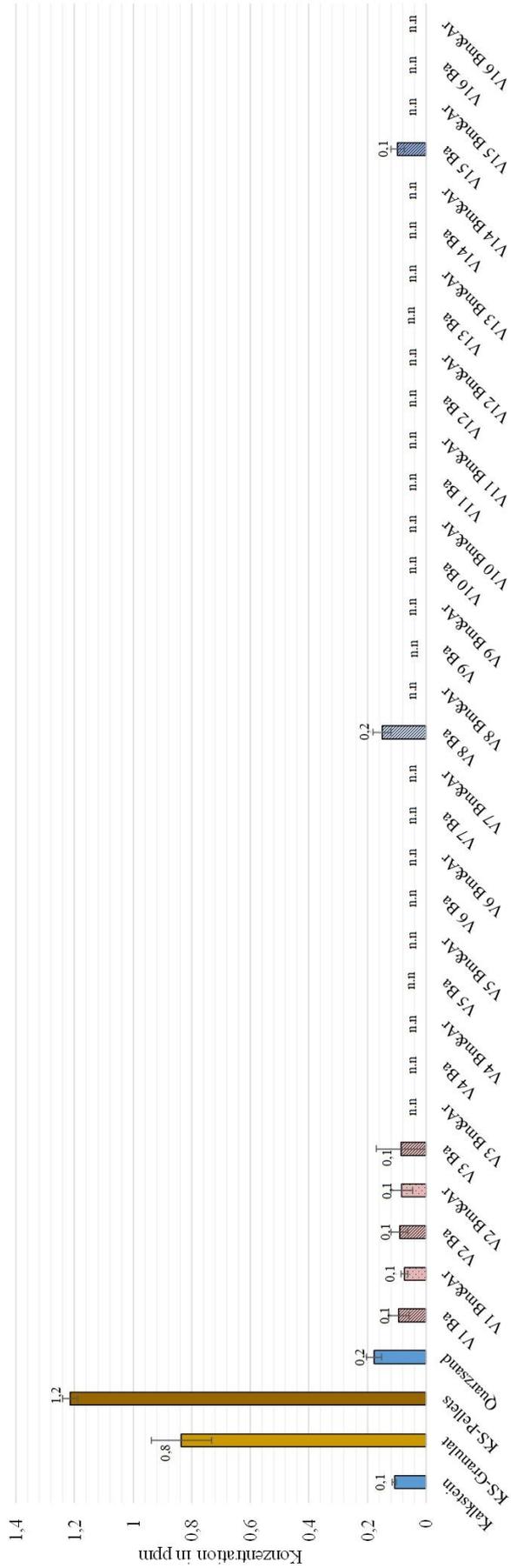


Abbildung 73: Konzentration von Quecksilber

Schwefel

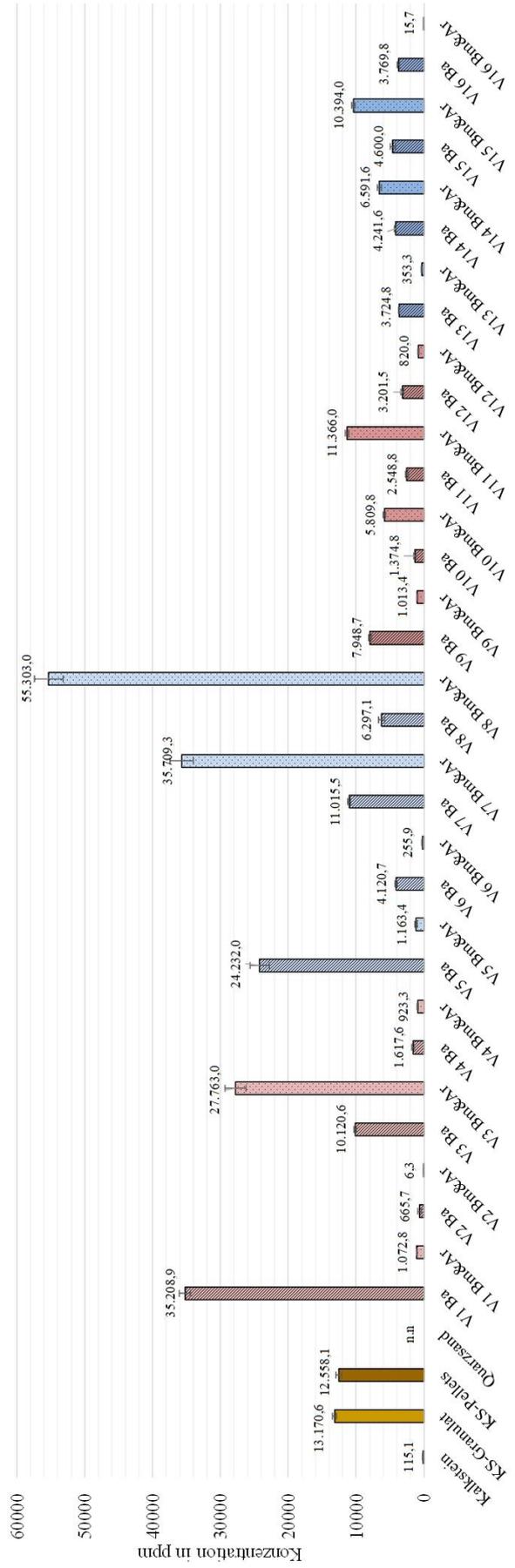


Abbildung 74: Konzentration von Schwefel

Silizium

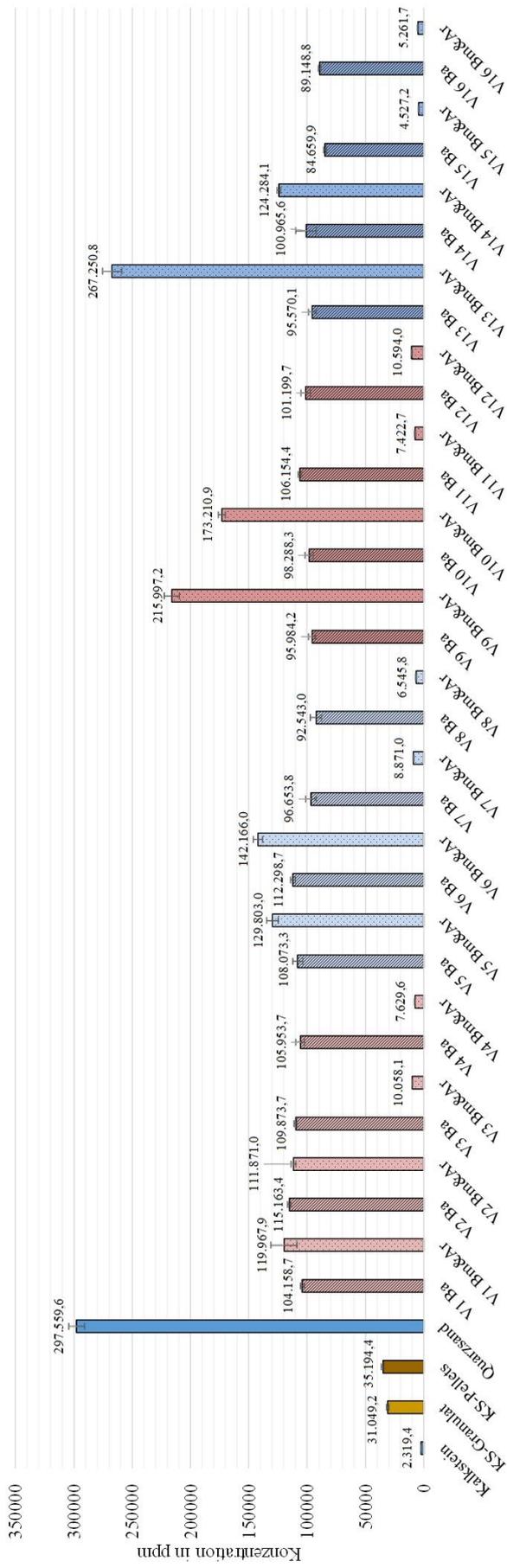


Abbildung 75: Konzentration von Silizium

Thallium

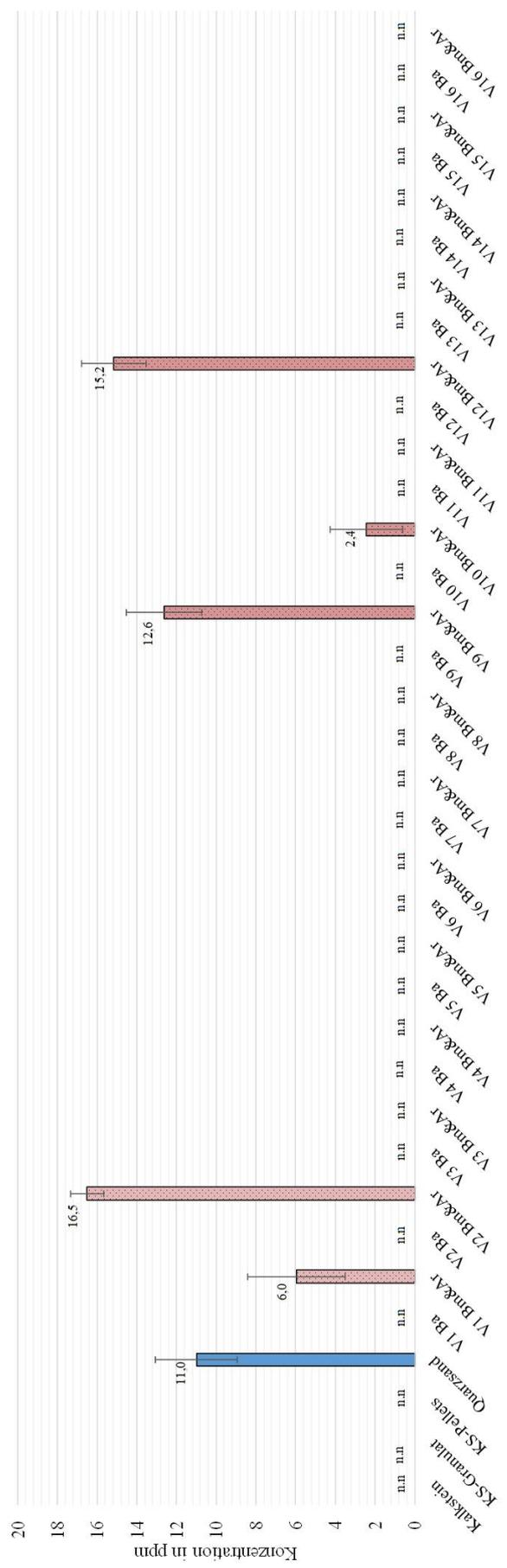


Abbildung 76: Konzentration von Thallium

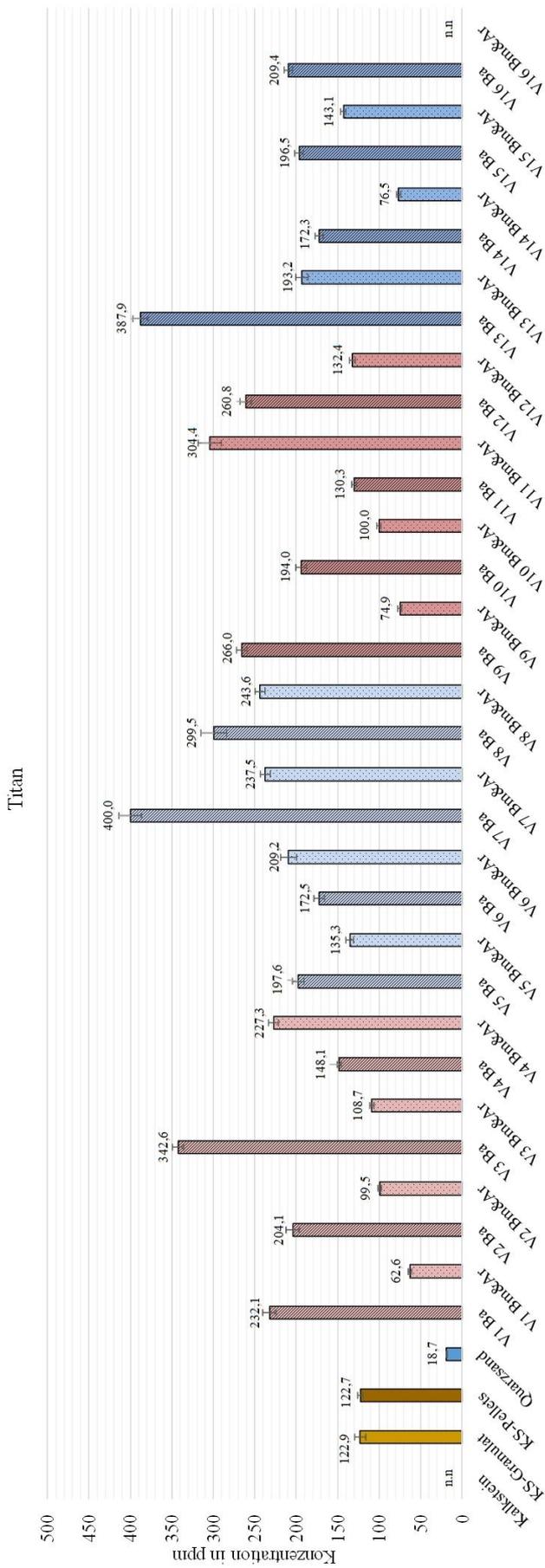


Abbildung 77: Konzentration von Titan

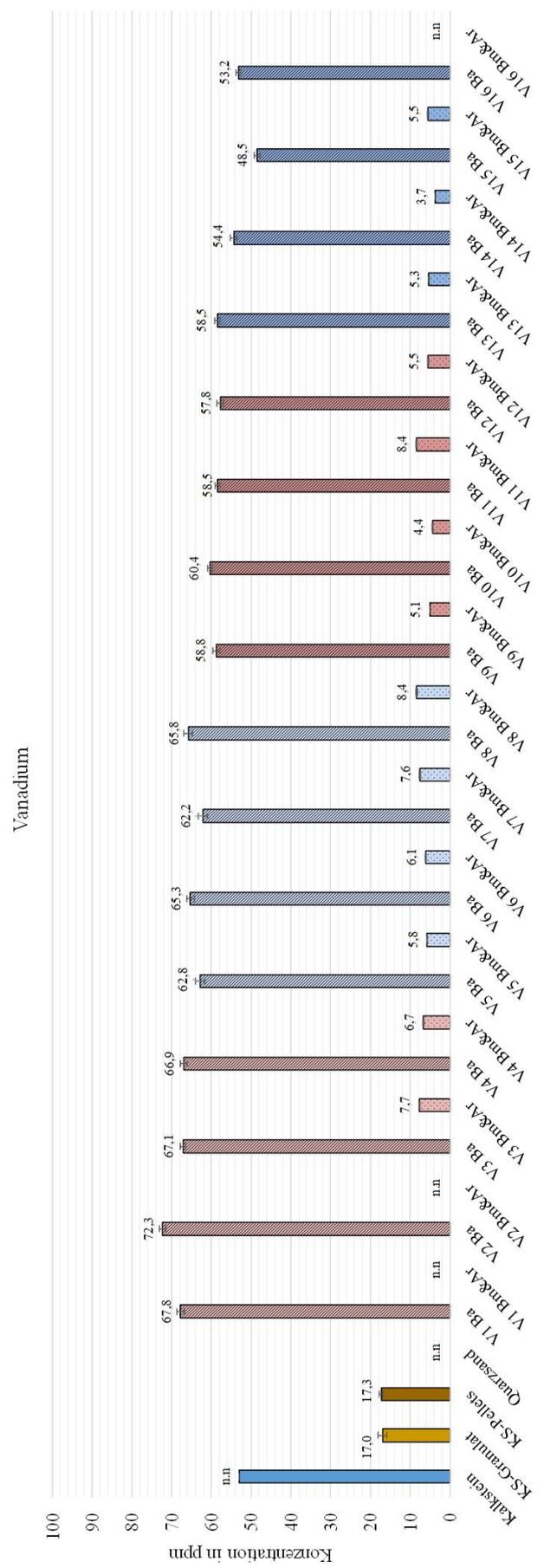


Abbildung 78: Konzentration von Vanadium

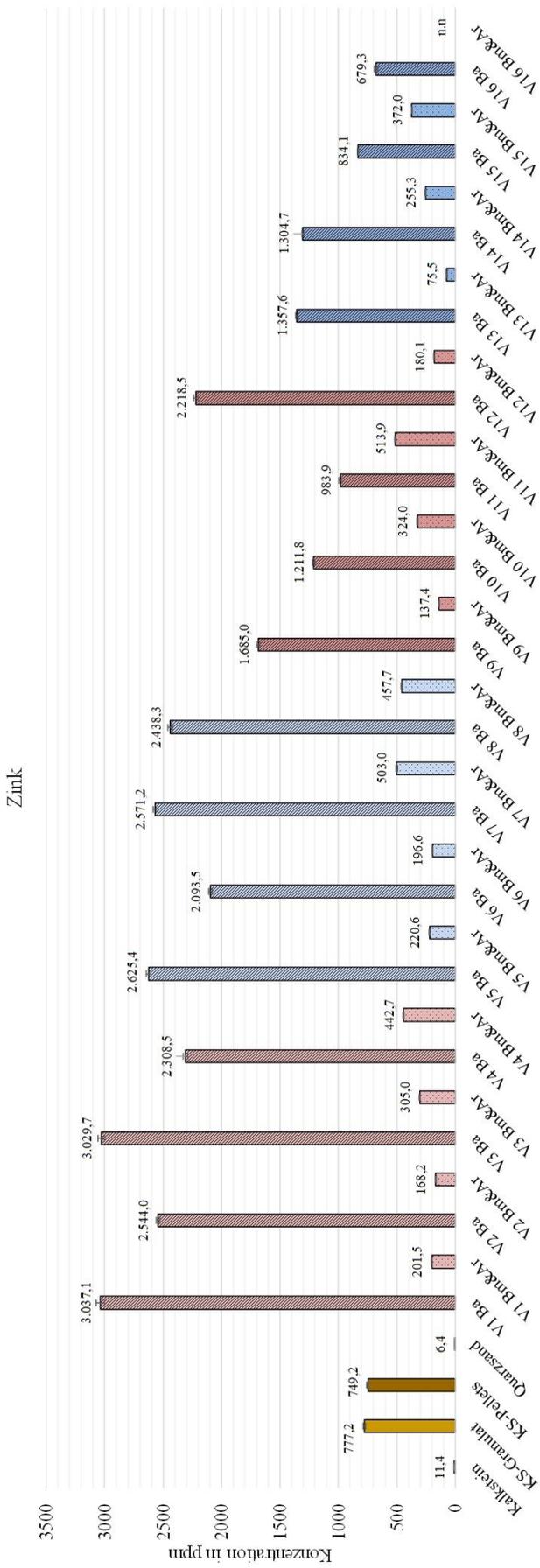


Abbildung 79: Konzentration von Zink

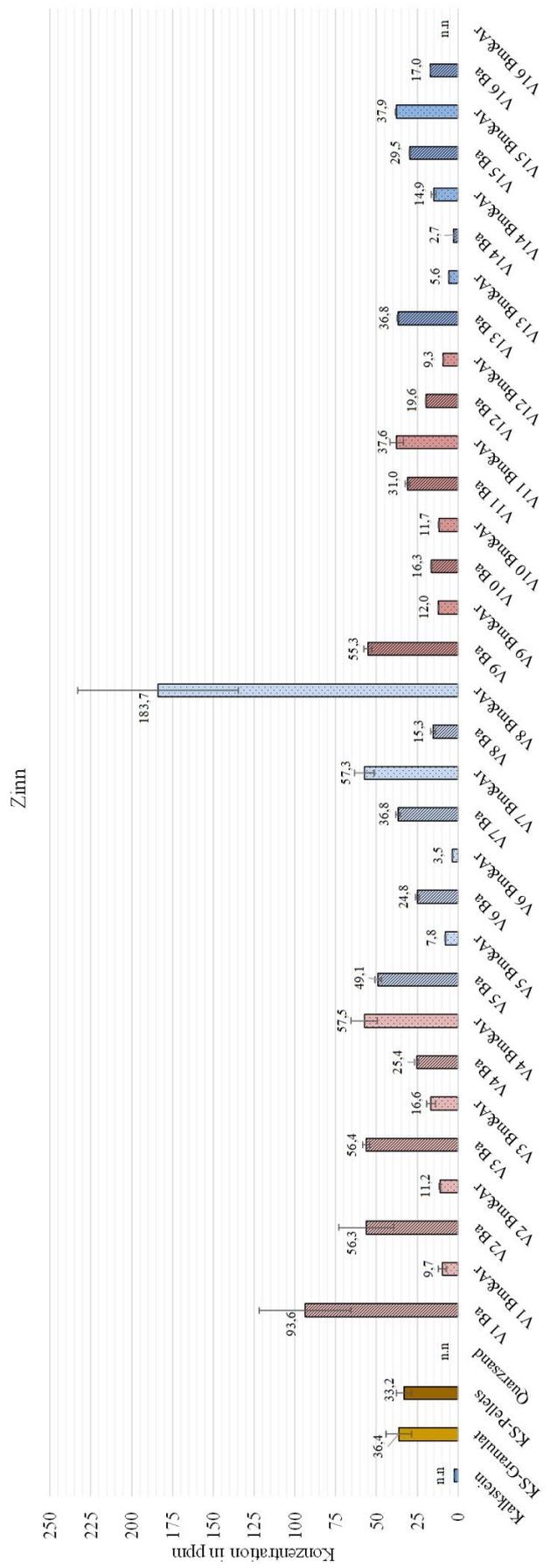


Abbildung 80: Konzentration von Zinn

# Analysenergebnisse ICP-OES

Bettmaterial	-					Quarz		Quarz	
Lamda	-					>1		>1	
Additive	-					-		-	
Temperatur	°C					750		950	
Elemente	Einheit	Kalkstein	KS-Granulat	KS-Pellets	Quarzsand	V1 Ba	V1 Bm&Ar	V2 Ba	V2 Bm&Ar
<b>Al</b>	<b>mg/kg</b>	726,217	10.470,33	10.133,46	7.852,31	40.738,15	11.105,59	41.048,10	10.710,17
	±[mg/kg](Al)	15,795	311,71	336,78	164,18	663,53	639,36	484,28	229,37
<b>As</b>	<b>mg/kg</b>	<0,5095	<0,5133	<0,4924	<0,4965	8,3	<0,5431	5,951	<0,4950
	±[mg/kg](As)	--	--	--	--	2,335	--	1,704	--
<b>Au</b>	<b>mg/kg</b>	16,086	<3,4394	1,975	<3,3267	<3,6151	<3,6387	1,994	<3,3168
	±[mg/kg](Au)	6,84	--	4,821	--	--	--	4,559	--
<b>Ba</b>	<b>mg/kg</b>	<5,0951	129,81	128,54	15,71	491,7	45,64	425,85	27,51
	±[mg/kg](Ba)	--	1,61	1,59	0,17	5,35	0,53	4,49	0,32
<b>Bi</b>									
<b>Br</b>									
<b>C</b>									
<b>Ca</b>		386.933,30	41.665,06	53.798,76	438,028	174.816,30	7.271,23	175.436,20	4.781,90
	±[mg/kg](Ca)	11.748,40	1.001,24	1.386,48	144,291	1.529,70	80,231	8.862,90	190,955
<b>Cd</b>	<b>mg/kg</b>	0,498	0,926	0,935	<0,2979	1,091	0,34	<0,3138	<0,2970
	±[mg/kg](Cd)	0,054	0,032	0,072	--	0,352	0,101	--	--
<b>Cl</b>									
<b>Co</b>	<b>mg/kg</b>	<1,5285	4,681	4,474	29,415	11,938	10,166	11,159	22,912
	±[mg/kg](Co)	--	0,028	0,033	0,29	3,371	0,059	4,554	0,076
<b>Cr</b>	<b>mg/kg</b>	<7,1332	59,2	60,04	<6,9513	208,92	36,55	260,56	73,66
	±[mg/kg](Cr)	--	0,71	0,63	--	2,3	0,5	3,01	2,12
<b>Cu</b>	<b>mg/kg</b>	<0,5095	300,58	290,07	1,992	1101,36	75,255	984,29	57,5
	±[mg/kg](Cu)	--	3,38	3,23	0,044	15,66	0,606	18,81	0,533
<b>Fe</b>	<b>mg/kg</b>	426,04	9.331,39	9.726,53	3.135,21	34.190,54	8.288,93	35.183,65	8.198,08
	±[mg/kg](Fe)	5,953	197,78	296,78	70,891	471,11	279,82	442,68	125,28
<b>Ga</b>									
<b>Ge</b>									
<b>Hg</b>	<b>mg/kg</b>	0,108	0,835	1,215	0,177	0,093	0,073	0,09	0,083
	±[mg/kg](Hg)	0,007	0,102	0,025	0,026	0,035	0,012	0,029	0,037
<b>Ir</b>									
<b>K</b>	<b>mg/kg</b>	487,703	2897,36	2982,79	254,214	12130,93	1053,963	9998,23	703,357
	±[mg/kg](K)	2,054	51,01	31,64	2,391	192,01	5,917	119,17	6,509
<b>Mg</b>	<b>mg/kg</b>	15.596,27	10.445,01	9.818,18	560,107	36.473,36	3.148,35	39.682,74	2.122,21
	±[mg/kg](Mg)	575,73	293,85	336,97	34,977	495,94	166,04	436,94	15,283
<b>Mn</b>	<b>mg/kg</b>	31,2	183,42	182,66	180,57	649,61	135,34	716,93	157,88
	±[mg/kg](Mn)	0,36	2,07	2	2,21	8,96	1,62	8,8	1,76
<b>Mo</b>	<b>mg/kg</b>	0,652	7,318	6,653	<3,2274	17,896	2,489	17,632	1,582
	±[mg/kg](Mo)	0,155	0,435	0,041	--	4,817	0,218	7,48	0,062
<b>Na</b>	<b>mg/kg</b>	28,849	124,742	128,763	3,684	646,585	41,592	760,888	35,594
	±[mg/kg](Na)	0,227	0,403	1,056	0,191	96,566	0,464	238,745	0,213
<b>Nb</b>									
<b>Ni</b>	<b>mg/kg</b>	<23,4375	46,98	45,3	<22,8401	175,24	15,4	204,46	72,06
	±[mg/kg](Ni)	--	2,37	1,47	--	2,96	0,62	2,79	1,99
<b>O</b>									
<b>P</b>	<b>mg/kg</b>	14,795	18640,91	18600,06	<7,9444	69895,8	4824,31	75278,5	3145,78
	±[mg/kg](P)	1,585	236,25	210,14	--	645,6	57,73	529,9	34,45
<b>Pb</b>	<b>mg/kg</b>	<7,1332	<7,1869	61,14	<6,9513	164,98	<7,6032	<7,3222	<6,9307
	±[mg/kg](Pb)	--	--	4,46	--	6,07	--	--	--

Bettmaterial	-					Quarz	Quarz			
Lamda	-					>1	>1			
Additive	-					-	-			
Temperatur	°C					750	950			
<b>Elemente</b>	<b>Einheit</b>	<b>Kalkstein</b>	<b>KS-Granulat</b>	<b>KS-Pellets</b>	<b>Quarzsand</b>	<b>V1 Ba</b>	<b>V1 Bm&amp;Ar</b>	<b>V2 Ba</b>	<b>V2 Bm&amp;Ar</b>	
<b>Rb</b>										
<b>Rh</b>										
<b>Ru</b>										
<b>S</b>	<b>mg/kg</b>	115,076	13170,58	12558,07	<2,8302	35208,9	1072,845	665,719	6,305	
	<b>±[mg/kg](S)</b>	136,516	292,92	422,82	--	803,7	16,378	248,096	44,585	
<b>Sb</b>	<b>mg/kg</b>	<0,3567	1,316	2,491	<0,3476	5,853	<0,3802	<0,3661	0,391	
	<b>±[mg/kg](Sb)</b>	--	0,973	0,818	--	2,857	--	--	0,115	
<b>Se</b>	<b>mg/kg</b>	1,016	1,103	1,739	0,74	0,532	<0,4345	<0,4184	0,59	
	<b>±[mg/kg](Se)</b>	0,055	0,492	0,267	0,312	0,077	--	--	0,053	
<b>Si</b>	<b>mg/kg</b>	2.319,42	31.049,15	35.194,35	297.559,60	104.158,70	119.967,90	115.163,44	111.871,00	
		123,794	1.139,30	1.056,05	6.925,50	1.702,00	11.385,80	1.460,11	1.959,30	
<b>Sn</b>	<b>mg/kg</b>	<2,5985	36,399	33,238	<2,5323	93,64	9,668	56,318	11,206	
	<b>±[mg/kg](Sn)</b>	--	7,884	4,673	--	28,146	2,437	16,821	0,514	
<b>Sr</b>										
<b>Ti</b>	<b>mg/kg</b>	<5,0951	122,934	122,669	18,729	232,056	62,626	204,09	99,541	
	<b>±[mg/kg](Ti)</b>	--	6,659	3,349	0,661	8,124	1,918	8,168	2,098	
<b>Tl</b>	<b>mg/kg</b>	<4,8404	<4,8768	<4,6783	10,99	<5,1259	5,965	<4,9686	16,507	
		--	--	--	2,061	--	2,448	--	0,825	
<b>V</b>	<b>mg/kg</b>	<52,9891	16,97	17,28	<51,6385	67,78	<56,4808	72,29	<51,4851	
	<b>±[mg/kg](V)</b>	--	1,08	0,47	--	0,92	--	0,75	--	
<b>W</b>										
<b>Zn</b>	<b>mg/kg</b>	11,38	777,19	749,16	6,404	3037,1	201,48	2544	168,22	
	<b>±[mg/kg](Zn)</b>	0,035	8,43	7,73	0,129	35,4	2,77	13,9	1,94	
<b>Zr</b>										
<b>Bettasche</b>	<b>g</b>					93,48		53,81		
<b>Flugasche</b>	<b>g</b>					2,61		33,18		
<b>Eduktmass</b>	<b>g</b>	-				450,87		410,35		
<b>Aschegehalt</b>	<b>mass.-%</b>					26,67		24,76		
<b>Bettaschegehalt</b>	<b>mass.-%</b>					20,73		13,11		
<b>Flugaschegehalt</b>	<b>mass.-%</b>					0,58		8,08		
<b>Ascherückstände</b>	<b>mass.-%</b>					5,36		3,56		

Bettmaterial	-	Kalkstein		Kalkstein		Quarz		Quarz	
Lamda	-	>1		>1		<1		<1	
Additive	-	-		-		-		-	
Temperatur	°C	750		950		750		950	
Elemente	Einheit	V3 Ba	V3 Bm&Ar	V4 Ba	V4 Bm&Ar	V5 Ba	V5 Bm&Ar	V6 Ba	V6 Bm&Ar
<b>Al</b>	<b>mg/kg</b>	40.723,93	4.564,63	43.808,14	3.716,23	41.387,07	11.706,76	42.691,83	10.175,79
	$\pm$ [mg/kg](Al)	438,06	16,103	1.265,23	105,943	1.626,93	123,46	612,99	290,18
<b>As</b>	<b>mg/kg</b>	5,584	4,167	3,471	6,567	5,144	<0,4062	3,018	<0,4589
	$\pm$ [mg/kg](As)	1,154	1,202	0,727	1,908	1,019	--	0,417	--
<b>Au</b>	<b>mg/kg</b>	9,195	30,129	2,936	26,843	7,247	2,898	12,68	3,813
	$\pm$ [mg/kg](Au)	6,613	4,073	8,949	1,219	10,639	1,058	2,366	1,517
<b>Ba</b>	<b>mg/kg</b>	504,98	38,502	413,2	23,88	478,81	35,977	421,51	32,72
	$\pm$ [mg/kg](Ba)	5,12	0,101	4,33	0,081	5,5	0,154	4,42	0,077
<b>Bi</b>									
<b>Br</b>									
<b>C</b>									
<b>Ca</b>		175.826,30	957.639,10	190.421,90	601.234,20	160.420,10	11.389,72	176.513,90	11.856,60
	$\pm$ [mg/kg](Ca)	7.727,90	19.664,50	3.467,00	14.334,90	9.450,10	644,27	7.880,80	124,18
<b>Cd</b>	<b>mg/kg</b>	1,902	0,497	<0,3062	<0,2876	<0,2889	<0,2437	<0,2792	<0,2753
	$\pm$ [mg/kg](Cd)	0,216	0,014	--	--	--	--	--	--
<b>Cl</b>									
<b>Co</b>	<b>mg/kg</b>	13,817	2,031	13,37	2,531	12,885	9,338	14,323	4,872
	$\pm$ [mg/kg](Co)	0,115	0,274	0,053	0,187	0,098	0,131	0,265	0,149
<b>Cr</b>	<b>mg/kg</b>	232,09	32,197	233,79	58,397	223,01	24,442	231,52	24,291
	$\pm$ [mg/kg](Cr)	2,47	0,053	2,47	0,612	2,27	0,135	2,35	0,158
<b>Cu</b>	<b>mg/kg</b>	1099,57	162,1	952,98	214,79	1102,36	85,59	982,31	76,79
	$\pm$ [mg/kg](Cu)	11,68	1,74	12,66	3,08	11,51	1,1	10,49	0,82
<b>Fe</b>	<b>mg/kg</b>	34.101,40	4.719,72	36.733,64	4.421,60	34.629,38	6.323,90	35.711,47	6.060,66
	$\pm$ [mg/kg](Fe)	396,87	49,62	1.249,18	58,79	1.273,27	68,08	482,49	119,78
<b>Ga</b>									
<b>Ge</b>									
<b>Hg</b>	<b>mg/kg</b>	0,085	<0,0491	<0,0510	<0,0479	<0,0482	<0,0406	<0,0465	<0,0459
	$\pm$ [mg/kg](Hg)	0,084	--	--	--	--	--	--	--
<b>Ir</b>									
<b>K</b>	<b>mg/kg</b>	12773,95	2138,714	11220,78	1525,251	11336,86	984,961	9970,88	909,447
	$\pm$ [mg/kg](K)	164,86	27,254	157,32	31,734	172,96	8,957	140,96	17,857
<b>Mg</b>	<b>mg/kg</b>	37.062,08	21.667,81	41.921,13	24.545,06	37.536,00	3.697,56	39.837,68	3.450,11
	$\pm$ [mg/kg](Mg)	402,72	523,34	1.439,44	261,28	1.736,69	40,54	456,82	90,38
<b>Mn</b>	<b>mg/kg</b>	668,69	119,96	656,4	136,54	609,03	137,34	602,99	133,71
	$\pm$ [mg/kg](Mn)	7,23	1,23	6,88	1,83	6,36	1,83	6,16	1,4
<b>Mo</b>	<b>mg/kg</b>	19,659	3,52	17,196	7,265	19,251	1,716	19,347	1,702
	$\pm$ [mg/kg](Mo)	0,328	0,114	0,299	0,149	0,475	0,196	0,466	0,048
<b>Na</b>	<b>mg/kg</b>	694,336	105,882	844,387	109,919	875,647	64,111	915,058	79,043
	$\pm$ [mg/kg](Na)	3,139	1,325	4,168	2,186	6,949	0,521	4,356	1,084
<b>Nb</b>									
<b>Ni</b>	<b>mg/kg</b>	173,3	18,001	172,82	26,546	163,25	15,465	165,52	16,612
	$\pm$ [mg/kg](Ni)	2,99	0,309	3,9	0,271	1,85	0,058	1,98	0,148
<b>O</b>									
<b>P</b>	<b>mg/kg</b>	64323,5	6678,04	63668,5	4915,31	61950,7	4457,05	62438,4	4993,89
	$\pm$ [mg/kg](P)	593,6	83,51	1051,9	63,17	344,6	63,53	664,6	50,91
<b>Pb</b>	<b>mg/kg</b>	223,01	13,433	70,45	<0,6711	133,76	7,427	<6,5136	<0,6424
	$\pm$ [mg/kg](Pb)	4,83	1,024	9,37	--	2,43	0,222	--	--

Bettmaterial	-	Kalkstein		Kalkstein		Quarz		Quarz	
Lamda	-	>1		>1		<1		<1	
Additive	-	-		-		-		-	
Temperatur	°C	750		950		750		950	
<b>Elemente</b>	<b>Einheit</b>	<b>V3 Ba</b>	<b>V3 Bm&amp;Ar</b>	<b>V4 Ba</b>	<b>V4 Bm&amp;Ar</b>	<b>V5 Ba</b>	<b>V5 Bm&amp;Ar</b>	<b>V6 Ba</b>	<b>V6 Bm&amp;Ar</b>
<b>Rb</b>									
<b>Rh</b>									
<b>Ru</b>									
<b>S</b>	<b>mg/kg</b>	10120,64	27763	1617,57	923,33	24232	1163,4	4120,66	255,92
	<b>±[mg/kg](S)</b>	163,18	1561,9	163,86	75,08	1447,2	158,32	169,28	92,17
<b>Sb</b>	<b>mg/kg</b>	0,542	<0,3436	<0,3573	3,467	<0,3371	0,366	<0,3257	<0,3212
	<b>±[mg/kg](Sb)</b>	0,552	--	--	0,837	--	0,037	--	--
<b>Se</b>	<b>mg/kg</b>	<0,3997	1,15	<0,4083	1,104	1,504	0,691	0,577	0,648
	<b>±[mg/kg](Se)</b>	--	0,222	--	0,365	0,121	0,059	0,28	0,127
<b>Si</b>	<b>mg/kg</b>	109.873,69	10.058,07	105.953,70	7.629,56	108.073,29	129.803,00	112.298,66	142.166,00
		1.339,45	110,344	3.610,47	311,926	4.298,43	4.883,50	1.916,81	4.197,60
<b>Sn</b>	<b>mg/kg</b>	56,418	16,647	25,436	57,47	49,072	7,836	24,824	3,538
	<b>±[mg/kg](Sn)</b>	2,159	2,614	1,361	8,093	1,882	0,512	1,078	0,062
<b>Sr</b>									
<b>Ti</b>	<b>mg/kg</b>	342,561	108,746	148,074	227,258	197,639	135,321	172,482	209,232
	<b>±[mg/kg](Ti)</b>	6,567	2,695	2,604	6,061	7,032	4,388	6,329	9,543
<b>Tl</b>	<b>mg/kg</b>	<4,7468	<4,6630	<4,8486	<4,5542	<4,5746	<3,8587	<4,4200	<4,3591
		--	--	--	--	--	--	--	--
<b>V</b>	<b>mg/kg</b>	67,14	7,687	66,92	6,716	62,84	5,777	65,26	6,092
	<b>±[mg/kg](V)</b>	0,69	0,094	0,87	0,102	1,19	0,033	1	0,109
<b>W</b>									
<b>Zn</b>	<b>mg/kg</b>	3029,7	305,04	2308,5	442,65	2625,4	220,6	2093,5	196,58
	<b>±[mg/kg](Zn)</b>	25,5	3,27	20,5	4,58	17,5	2,36	14,9	2,11
<b>Zr</b>									
<b>Bettasche</b>	<b>g</b>	133,23		61,63		97,90		115,60	
<b>Flugasche</b>	<b>g</b>	-12,46		61,11		43,95		129,19	
<b>Eduktmass</b>	<b>g</b>	455,94		455,94		555,10		913,70	
<b>Aschegehalt</b>	<b>mass.-%</b>	28,98		29,28		30,09		29,85	
<b>Bettaschegehalt</b>	<b>mass.-%</b>	29,22		13,52		17,64		12,65	
<b>Flugaschegehalt</b>	<b>mass.-%</b>	-2,73		13,40		7,92		14,14	
<b>Ascherückstände</b>	<b>mass.-%</b>	2,49		2,36		4,54		3,06	

Bettmaterial	-	Kalkstein		Kalkstein		Quarz		Quarz	
Lambda	-	<1		<1		>1		>1	
Additive	-	-		-		CaCl <sub>2</sub>		CaCl <sub>2</sub>	
Temperatur	°C	750		950		750		950	
Elemente	Einheit	V7 Ba	V7 Bm&Ar	V8 Ba	V8 Bm&Ar	V9 Ba	V9 Bm&Ar	V10 Ba	V10 Bm&Ar
<b>Al</b>	<b>mg/kg</b>	37.543,27	5.113,98	43.266,63	3.227,40	35.114,53	10.002,11	36.723,37	9.545,90
	±[mg/kg](Al)	1.526,25	74,66	801,74	144,24	1.042,66	140,13	1.193,05	207,25
<b>As</b>	<b>mg/kg</b>	3,246	5,787	<0,5384	23,092	3,638	<0,4727	1,377	<0,4670
	±[mg/kg](As)	0,866	0,832	--	7,014	0,785	--	0,314	--
<b>Au</b>	<b>mg/kg</b>	7,367	32,118	4,194	20,303	<3,3873	<3,1673	3,547	4,563
	±[mg/kg](Au)	12,612	2,326	8,601	5,833	--	--	7,833	4,857
<b>Ba</b>	<b>mg/kg</b>	466,31	36,889	425,96	31,19	433,33	28,388	410,28	13,191
	±[mg/kg](Ba)	4,86	0,088	4,33	0,34	4,42	0,37	4,52	0,044
<b>Bi</b>									
<b>Br</b>									
<b>C</b>									
<b>Ca</b>		169.106,00	528.597,90	186.350,50	506.472,40	212.823,70	17.811,14	233.082,70	13.282,46
	±[mg/kg](Ca)	2.368,10	6.342,80	1.439,60	12.817,90	7.921,30	7.789,64	1.619,10	146,21
<b>Cd</b>	<b>mg/kg</b>	<0,2962	<0,2804	<0,3230	0,44	<0,3033	<0,2836	<0,2907	0,696
	±[mg/kg](Cd)	--	--	--	0,047	--	--	--	0,074
<b>Cl</b>									
<b>Co</b>	<b>mg/kg</b>	13,183	2,603	12,052	2,797	13,474	32,344	14,538	1,74
	±[mg/kg](Co)	0,299	0,23	3,758	0,267	0,234	0,356	0,288	0,218
<b>Cr</b>	<b>mg/kg</b>	293,69	23,77	221,34	79,24	1030,98	289,29	391,62	306,72
	±[mg/kg](Cr)	3,26	0,137	2,58	1,41	20,19	3,62	4,79	3,38
<b>Cu</b>	<b>mg/kg</b>	983,23	194,47	940,04	210,42	633,8	40,57	253,17	104,92
	±[mg/kg](Cu)	16,93	5,21	10,83	2,22	23,76	0,54	3,34	1,15
<b>Fe</b>	<b>mg/kg</b>	32.199,52	4.616,76	35.908,36	3.795,75	38.416,72	10.274,04	31.663,63	13.358,74
	±[mg/kg](Fe)	976,7	86,47	505,93	76,741	1.004,86	197,6	924,58	301,62
<b>Ga</b>									
<b>Ge</b>									
<b>Hg</b>	<b>mg/kg</b>	<0,0494	<0,0467	0,15	<0,0523	<0,0506	<0,0473	<0,0484	<0,0467
	±[mg/kg](Hg)	--	--	0,031	--	--	--	--	--
<b>Ir</b>									
<b>K</b>	<b>mg/kg</b>	11323,46	2438,559	10792,04	1458,372	8373,77	780,992	3248,71	1902,221
	±[mg/kg](K)	210,69	17,71	137,08	6,842	101,34	9,896	42,75	21,081
<b>Mg</b>	<b>mg/kg</b>	35.444,34	23.251,26	40.615,19	20.174,59	32.946,00	1.841,10	34.385,66	2.150,07
	±[mg/kg](Mg)	406,19	504,34	1.276,61	343,64	354,97	29,518	453,73	111,112
<b>Mn</b>	<b>mg/kg</b>	594,02	115,83	600,52	146,05	812,84	226,21	615,8	284,35
	±[mg/kg](Mn)	7,38	1,67	6,53	1,5	18,03	2,37	8,21	2,9
<b>Mo</b>	<b>mg/kg</b>	18,963	3,622	15,879	7,998	22,078	3,623	29,349	2,37
	±[mg/kg](Mo)	0,065	0,038	4,775	0,089	0,341	0,147	0,304	0,5
<b>Na</b>	<b>mg/kg</b>	630,226	117,654	837,792	82,333	528,904	58,877	477,053	99,695
	±[mg/kg](Na)	5,728	0,757	100,067	0,51	6,01	0,318	2,354	1,159
<b>Nb</b>									
<b>Ni</b>	<b>mg/kg</b>	165,4	17,121	172,3	50,78	628,34	199,016	676,05	100,907
	±[mg/kg](Ni)	1,9	0,142	1,77	1,24	6,48	2,73	8,24	0,288
<b>O</b>									
<b>P</b>	<b>mg/kg</b>	62543,7	7238,68	73748,4	5615,04	57742,3	2821,33	60606	1845,03
	±[mg/kg](P)	374,1	134,66	433,2	60,73	872,5	37,58	632,9	50,29
<b>Pb</b>	<b>mg/kg</b>	134,3	10,128	<7,5377	<7,3222	<7,0779	<0,6618	<6,7829	19,549
	±[mg/kg](Pb)	6,68	0,911	--	--	--	--	--	0,512

Bettmaterial	-	Kalkstein		Kalkstein		Quarz		Quarz	
Lamda	-	<1		<1		>1		>1	
Additive	-	-		-		CaCl <sub>2</sub>		CaCl <sub>2</sub>	
Temperatur	°C	750		950		750		950	
Elemente	Einheit	V7 Ba	V7 Bm&Ar	V8 Ba	V8 Bm&Ar	V9 Ba	V9 Bm&Ar	V10 Ba	V10 Bm&Ar
<b>Rb</b>									
<b>Rh</b>									
<b>Ru</b>									
<b>S</b>	<b>mg/kg</b>	11015,47	35709,3	6297,11	55303	7948,73	1013,41	1374,8	5809,84
	<b>±[mg/kg](S)</b>	228,04	1720	436,07	2113,4	219,98	42,24	188,2	172,84
<b>Sb</b>	<b>mg/kg</b>	1,231	2,912	<0,3769	14,397	1,571	<0,3309	<0,3391	<0,3269
	<b>±[mg/kg](Sb)</b>	0,476	0,934	--	5,581	0,427	--	--	--
<b>Se</b>	<b>mg/kg</b>	1,317	2,231	0,732	4,766	<0,4044	0,723	<0,3876	1,229
	<b>±[mg/kg](Se)</b>	0,388	0,264	0,381	1,185	--	0,02	--	0,167
<b>Si</b>	<b>mg/kg</b>	96.653,81	8.871,03	92.543,00	6.545,83	95.984,15	215.997,20	98.288,33	173.210,90
		4.407,92	209,53	4.543,20	270,662	3.004,04	6.375,30	3.639,43	3.133,90
<b>Sn</b>	<b>mg/kg</b>	36,765	57,347	15,284	183,744	55,252	12,042	16,329	11,65
	<b>±[mg/kg](Sn)</b>	1,513	6,22	1,497	49,119	2,597	0,148	0,358	0,31
<b>Sr</b>									
<b>Ti</b>	<b>mg/kg</b>	399,975	237,511	299,514	243,598	266,011	74,888	193,966	100,035
	<b>±[mg/kg](Ti)</b>	13,785	5,927	15,555	6,019	6,311	2,401	6,079	2,543
<b>Tl</b>	<b>mg/kg</b>	<4,6906	<4,4393	<5,1149	<4,9686	<4,8028	12,625	<4,6027	2,438
		--	--	--	--	--	1,89	--	1,839
<b>V</b>	<b>mg/kg</b>	62,15	7,573	65,82	8,42	58,75	5,067	60,35	4,42
	<b>±[mg/kg](V)</b>	1,19	0,093	1,07	0,21	0,82	0,077	0,65	0,066
<b>W</b>									
<b>Zn</b>	<b>mg/kg</b>	2571,2	502,95	2438,3	457,73	1685	137,4	1211,8	323,97
	<b>±[mg/kg](Zn)</b>	13,6	7,37	19,4	4,88	16,1	2,63	8	3,32
<b>Zr</b>									
<b>Bettasche</b>	<b>g</b>	144,03		150,03		72,00		120,70	
<b>Flugasche</b>	<b>g</b>	69,11		70,62		64,20		23,30	
<b>Eduktmass</b>	<b>g</b>	769,29		914,92		475,92		503,91	
<b>Aschegehalt</b>	<b>mass.-%</b>	29,80		25,28		32,21		30,69	
<b>Bettaschegehalt</b>	<b>mass.-%</b>	18,72		16,40		15,13		23,95	
<b>Flugaschegehalt</b>	<b>mass.-%</b>	8,98		7,72		13,49		4,62	
<b>Ascherückstände</b>	<b>mass.-%</b>	2,10		1,16		3,59		2,11	

Bettmaterial	-	Kalkstein		Kalkstein		Quarz		Quarz	
Lamda	-	>1		>1		<1		<1	
Additive	-	CaCl <sub>2</sub>		CaCl <sub>2</sub>		CaCl <sub>2</sub>		CaCl <sub>2</sub>	
Temperatur	°C	750		950		750		950	
Elemente	Einheit	V11 Ba	V11 Bm&Ar	V12 Ba	V12 Bm&Ar	V13 Ba	V13 Bm&Ar	V14 Ba	V14 Bm&Ar
<b>Al</b>	<b>mg/kg</b>	38.360,43	2.702,75	36.661,25	3.462,17	34.498,36	9.321,40	35.533,00	8.391,43
	<b>±[mg/kg](Al)</b>	673,51	120,571	1.279,25	36,45	1.159,45	272,01	3.002,67	115,67
<b>As</b>	<b>mg/kg</b>	2,637	2,486	1,408	<0,4399	0,913	<0,5008	<0,4875	<0,4765
	<b>±[mg/kg](As)</b>	0,789	0,95	0,512	--	0,553	--	--	--
<b>Au</b>	<b>mg/kg</b>	9,012	<3,3999	<3,4643	<2,9472	<3,4584	<3,3556	17,141	39,479
	<b>±[mg/kg](Au)</b>	1,588	--	--	--	--	--	18,869	5,454
<b>Ba</b>	<b>mg/kg</b>	375,37	34,861	420,89	32,85	413,76	26,848	378,15	11,247
	<b>±[mg/kg](Ba)</b>	3,83	0,094	5,09	0,137	5,1	0,158	4,03	0,07
<b>Bi</b>									
<b>Br</b>									
<b>C</b>									
<b>Ca</b>		234.502,30	789.786,50	246.895,60	500.193,40	208.923,60	8.500,93	230.161,90	7.989,84
	<b>±[mg/kg](Ca)</b>	9.370,00	39.319,20	3.936,40	7.246,10	10.589,40	79,209	6.302,90	134,564
<b>Cd</b>	<b>mg/kg</b>	<0,2714	0,696	<0,3102	<0,2639	<0,3097	<0,3005	<0,2925	0,328
	<b>±[mg/kg](Cd)</b>	--	0,106	--	--	--	--	--	0,218
<b>Cl</b>									
<b>Co</b>	<b>mg/kg</b>	12,364	4,095	11,753	40,478	15,657	8,39	18,087	<1,4295
	<b>±[mg/kg](Co)</b>	0,173	0,123	0,19	0,524	0,085	0,137	0,334	--
<b>Cr</b>	<b>mg/kg</b>	241,49	800,49	360,08	299,59	1404,11	221,02	210,39	146,09
	<b>±[mg/kg](Cr)</b>	2,73	8,82	3,99	3,14	15,06	2,91	2,22	2,19
<b>Cu</b>	<b>mg/kg</b>	488,88	279,87	366,81	108,69	488,8	46,77	551,29	107,06
	<b>±[mg/kg](Cu)</b>	8,24	3,48	7,08	1,26	6,71	0,55	10,01	2,04
<b>Fe</b>	<b>mg/kg</b>	32.862,31	6.447,40	32.962,72	9.217,02	46.811,60	7.591,59	28.495,04	6.410,47
	<b>±[mg/kg](Fe)</b>	411,49	188,24	947,59	131,73	1.086,05	140,37	1.624,21	70,51
<b>Ga</b>									
<b>Ge</b>									
<b>Hg</b>	<b>mg/kg</b>	<0,0452	<0,0507	<0,0517	<0,0440	<0,0516	<0,0501	<0,0487	<0,0476
	<b>±[mg/kg](Hg)</b>	--	--	--	--	--	--	--	--
<b>Ir</b>									
<b>K</b>	<b>mg/kg</b>	3385,25	4175,928	4879,04	907,478	7452,8	415,817	2704,76	2580,79
	<b>±[mg/kg](K)</b>	82,48	27,44	84,75	20,918	93,55	1,977	35,68	30,376
<b>Mg</b>	<b>mg/kg</b>	33.755,17	22.407,70	33.881,04	21.024,33	32.537,46	2.145,87	32.527,19	1.950,01
	<b>±[mg/kg](Mg)</b>	1.018,63	333,45	1.173,44	405,35	386,98	47,744	1.356,46	19,318
<b>Mn</b>	<b>mg/kg</b>	606,07	328,1	555,58	243,11	970,1	205,32	629,88	83,7
	<b>±[mg/kg](Mn)</b>	8,27	3,38	7,5	2,52	9,93	2,11	7	1
<b>Mo</b>	<b>mg/kg</b>	15,4	8,398	17,173	2,973	26,427	4,124	22,964	1,729
	<b>±[mg/kg](Mo)</b>	0,217	0,371	0,128	0,202	0,169	0,181	0,384	0,289
<b>Na</b>	<b>mg/kg</b>	401,056	152,288	563,839	60,794	458,21	60,014	372,769	107,65
	<b>±[mg/kg](Na)</b>	3,993	2,73	2,491	0,76	4,588	0,26	5,009	1,3
<b>Nb</b>									
<b>Ni</b>	<b>mg/kg</b>	170,97	260,416	261,48	180,106	1528,21	237,432	218,46	44,184
	<b>±[mg/kg](Ni)</b>	3,78	1,367	2,99	1,153	17	0,811	2,41	0,177
<b>O</b>									
<b>P</b>	<b>mg/kg</b>	60004,1	4540,58	59634,3	2869,26	54678,9	3438,48	54597,3	1389,61
	<b>±[mg/kg](P)</b>	639,3	60,67	316,8	30,69	667	46,9	681	15,38
<b>Pb</b>	<b>mg/kg</b>	<6,3329	16,157	<7,2389	<0,6158	<7,2264	<0,7012	<6,8248	12,614
	<b>±[mg/kg](Pb)</b>	--	2,539	--	--	--	--	--	1,019

Bettmaterial	-	Kalkstein		Kalkstein		Quarz		Quarz	
Lambda	-	>1		>1		<1		<1	
Additive	-	CaCl <sub>2</sub>		CaCl <sub>2</sub>		CaCl <sub>2</sub>		CaCl <sub>2</sub>	
Temperatur	°C	750		950		750		950	
Elemente	Einheit	V11 Ba	V11 Bm&Ar	V12 Ba	V12 Bm&Ar	V13 Ba	V13 Bm&Ar	V14 Ba	V14 Bm&Ar
<b>Rb</b>									
<b>Rh</b>									
<b>Ru</b>									
<b>S</b>	<b>mg/kg</b>	2548,8	11365,99	3201,48	819,96	3724,81	353,27	4241,57	6591,63
	<b>±[mg/kg](S)</b>	228,57	244,75	241,09	99,92	48,73	44,68	160,3	284,76
<b>Sb</b>	<b>mg/kg</b>	0,509	<0,3552	<0,3619	<0,3079	<0,3613	<0,3506	<0,3412	<0,3335
	<b>±[mg/kg](Sb)</b>	0,381	--	--	--	--	--	--	--
<b>Se</b>	<b>mg/kg</b>	<0,3619	1,304	<0,4137	0,663	<0,4129	0,532	1,029	1,734
	<b>±[mg/kg](Se)</b>	--	0,288	--	0,117	--	0,227	0,161	0,019
<b>Si</b>	<b>mg/kg</b>	106.154,41	7.422,74	101.199,74	10.593,99	95.570,06	267.250,80	100.965,56	124.284,10
		1.536,57	449,877	4.053,57	120,067	3.251,44	8.358,40	8.661,21	1.494,00
<b>Sn</b>	<b>mg/kg</b>	30,967	37,639	19,593	9,324	36,784	5,558	2,729	14,904
	<b>±[mg/kg](Sn)</b>	1,552	4,049	0,423	0,051	0,608	0,083	0,144	1,478
<b>Sr</b>									
<b>Ti</b>	<b>mg/kg</b>	130,256	304,412	260,822	132,447	387,905	193,226	172,311	76,47
	<b>±[mg/kg](Ti)</b>	2,933	14,025	7,087	3,493	9,109	7,342	4,76	2,647
<b>Tl</b>	<b>mg/kg</b>	<4,2973	<4,8207	<4,9121	15,157	<4,9036	<4,7579	<4,6311	<4,5267
		--	--	--	1,631	--	--	--	--
<b>V</b>	<b>mg/kg</b>	58,49	8,443	57,79	5,501	58,52	5,348	54,39	3,713
	<b>±[mg/kg](V)</b>	0,6	0,184	0,75	0,063	0,71	0,032	0,82	0,059
<b>W</b>									
<b>Zn</b>	<b>mg/kg</b>	983,9	513,91	2218,5	180,06	1357,6	75,48	1304,7	255,32
	<b>±[mg/kg](Zn)</b>	12,1	5,4	19,4	1,98	10,9	1,58	8,4	3,21
<b>Zr</b>									
<b>Bettasche</b>	<b>g</b>	168,03		58,78		173,50		155,60	
<b>Flugasche</b>	<b>g</b>	-11,95		13,13		104,46		135,91	
<b>Eduktmass</b>	<b>g</b>	537,50		251,96		881,84		881,84	
<b>Aschegehalt</b>	<b>mass.-%</b>	31,00		31,19		34,02		34,07	
<b>Bettaschegehalt</b>	<b>mass.-%</b>	31,26		23,33		19,67		17,64	
<b>Flugaschegehalt</b>	<b>mass.-%</b>	-2,22		5,21		11,85		15,41	
<b>Ascherückstände</b>	<b>mass.-%</b>	1,96		2,65		2,50		1,01	

Bettmaterial	-	Kalkstein		Kalkstein	
Lambda	-	<1		<1	
Additive	-	CaCl <sub>2</sub>		CaCl <sub>2</sub>	
Temperatur	°C	750		950	
Elemente	Einheit	V15 Ba	V15 Bm&Ar	V16 Ba	V16 Bm&Ar
<b>Al</b>	<b>mg/kg</b>	29.685,98	1.718,70	34.332,46	2.218,19
	±[mg/kg](Al)	528,93	20,638	388,97	22,301
<b>As</b>	<b>mg/kg</b>	0,749	1,382	0,919	<0,4899
	±[mg/kg](As)	0,624	0,749	0,46	--
<b>Au</b>	<b>mg/kg</b>	<3,4477	<3,1693	<3,3873	<3,2822
	±[mg/kg](Au)	--	--	--	--
<b>Ba</b>	<b>mg/kg</b>	284,75	16,895	367,42	<0,4899
	±[mg/kg](Ba)	3,23	0,059	3,73	--
<b>Bi</b>					
<b>Br</b>					
<b>C</b>					
<b>Ca</b>		254.107,10	840.753,30	241.577,50	595.340,70
	±[mg/kg](Ca)	8.878,10	9.402,80	6.080,60	4.459,80
<b>Cd</b>	<b>mg/kg</b>	<0,3087	<0,2838	<0,3033	<0,2939
	±[mg/kg](Cd)	--	--	--	--
<b>Cl</b>					
<b>Co</b>	<b>mg/kg</b>	13,232	2,838	12,965	<1,4696
	±[mg/kg](Co)	0,211	0,269	0,243	--
<b>Cr</b>	<b>mg/kg</b>	976,53	1105,01	741,42	<0,6858
	±[mg/kg](Cr)	10,91	12,36	7,67	--
<b>Cu</b>	<b>mg/kg</b>	523,32	260,68	583,4	1,362
	±[mg/kg](Cu)	5,98	3,55	6,09	0,06
<b>Fe</b>	<b>mg/kg</b>	35.379,89	2.677,84	30.367,98	10.547,70
	±[mg/kg](Fe)	418,94	60,83	318,21	179,9
<b>Ga</b>					
<b>Ge</b>					
<b>Hg</b>	<b>mg/kg</b>	0,097	<0,0473	<0,0506	<0,0490
	±[mg/kg](Hg)	0,023	--	--	--
<b>Ir</b>					
<b>K</b>	<b>mg/kg</b>	3746,06	4521,105	4402,9	44,765
	±[mg/kg](K)	51,04	55,585	57,54	0,082
<b>Mg</b>	<b>mg/kg</b>	29.309,39	20.308,12	31.925,71	28.425,05
	±[mg/kg](Mg)	976,71	450,89	527,97	468,54
<b>Mn</b>	<b>mg/kg</b>	717,43	386,08	530,1	1,518
	±[mg/kg](Mn)	8,18	4,42	5,59	0,015
<b>Mo</b>	<b>mg/kg</b>	19,891	4,826	16,923	<3,1842
	±[mg/kg](Mo)	0,337	0,286	0,366	--
<b>Na</b>	<b>mg/kg</b>	367,3	154,869	500,847	30,915
	±[mg/kg](Na)	2,603	2,572	2,696	0,174
<b>Nb</b>					
<b>Ni</b>	<b>mg/kg</b>	878,54	218,555	236,32	<2,2534
	±[mg/kg](Ni)	9,5	1,64	4,07	--
<b>O</b>					
<b>P</b>	<b>mg/kg</b>	49259,4	1643,64	54080,8	34,518
	±[mg/kg](P)	484	19,96	340,7	1,696
<b>Pb</b>	<b>mg/kg</b>	<7,2041	<0,6623	<7,0779	<0,6858
	±[mg/kg](Pb)	--	--	--	--

Bettmaterial	-	Kalkstein		Kalkstein	
Lambda	-	<1		<1	
Additive	-	CaCl <sub>2</sub>		CaCl <sub>2</sub>	
Temperatur	°C	750		950	
<b>Elemente</b>	<b>Einheit</b>	<b>V15 Ba</b>	<b>V15 Bm&amp;Ar</b>	<b>V16 Ba</b>	<b>V16 Bm&amp;Ar</b>
<b>Rb</b>					
<b>Rh</b>					
<b>Ru</b>					
<b>S</b>	<b>mg/kg</b>	4600	10394	3769,76	15,701
	<b>±[mg/kg](S)</b>	374,01	254,87	140,27	5,745
<b>Sb</b>	<b>mg/kg</b>	<0,3602	<0,3311	<0,3539	<0,3429
	<b>±[mg/kg](Sb)</b>	--	--	--	--
<b>Se</b>	<b>mg/kg</b>	0,495	2,016	0,619	0,765
	<b>±[mg/kg](Se)</b>	0,212	0,432	0,35	0,137
<b>Si</b>	<b>mg/kg</b>	84.659,91	4.527,20	89.148,79	5.261,69
		1.359,62	67,748	965,6	114,91
<b>Sn</b>	<b>mg/kg</b>	29,517	37,927	16,984	<2,4984
	<b>±[mg/kg](Sn)</b>	0,375	0,621	0,091	--
<b>Sr</b>					
<b>Ti</b>	<b>mg/kg</b>	196,451	143,078	209,351	<4,8988
	<b>±[mg/kg](Ti)</b>	5,275	2,852	5,058	--
<b>Tl</b>	<b>mg/kg</b>	<4,8885	<4,4939	<4,8028	<4,6538
		--	--	--	--
<b>V</b>	<b>mg/kg</b>	48,52	5,51	53,17	<5,0947
	<b>±[mg/kg](V)</b>	0,73	0,101	0,54	--
<b>W</b>					
<b>Zn</b>	<b>mg/kg</b>	834,1	372,04	679,3	<16,6558
	<b>±[mg/kg](Zn)</b>	5,7	4,31	15,9	--
<b>Zr</b>					
<b>Bettasche</b>	<b>g</b>	208,03		64,93	
<b>Flugasche</b>	<b>g</b>	95,80		21,616451	
<b>Eduktmass</b>	<b>g</b>	816,83		251,70	
<b>Aschegehalt</b>	<b>mass.-%</b>	37,76		34,3930933	
<b>Bettasche- gehalt</b>	<b>mass.-%</b>	25,47		25,80	
<b>Flugasche- gehalt</b>	<b>mass.-%</b>	11,73		8,59	
<b>Ascherück- stände</b>	<b>mass.-%</b>	0,56		0,01	

# Analysenergebnisse RFA

07/06/2018 11:51:16

PANalytical

Page 1

17/08/2018 14:02:03

PANalytical

Page 1

## Quantification of sample KS-Granulat

R.M.S.:	0,021
Result status:	
Sum before normalization:	37,8 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	4,600
Weight after pressing (g):	6,900
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 O	33,280	0,7
2 Ca	25,390	0,1
3 Si	8,780	0,08
4 Fe	8,533	0,08
5 P	8,223	0,08
6 S	4,342	0,06
7 Al	3,181	0,05
8 Mg	2,824	0,05
9 K	2,301	0,04
10 Ti	0,884	0,03
11 Zn	0,765	0,03
12 Cl	0,569	0,02
13 Cu	0,362	0,02
14 Mn	0,186	0,01
15 Cr	0,078	0,008
16 Pb	0,076	0,008
17 Sr	0,075	0,008
18 Ni	0,068	0,008
19 Zr	0,046	0,006
20 Rb	0,018	0,004
21 Bi	0,015	0,004
22 Nb	0,005	0,002

### Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	2,3

## Quantification of sample KS Pellets

R.M.S.:	0,007
Result status:	
Sum before normalization:	27,7 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	4,600
Weight after pressing (g):	9,200
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	42,466	0,1
2 Fe	13,197	0,1
3 Cl	12,363	0,1
4 Si	8,280	0,08
5 P	7,247	0,08
6 S	4,260	0,06
7 Al	2,956	0,05
8 K	2,865	0,05
9 Mg	2,112	0,04
10 Zn	1,275	0,03
11 Ti	1,243	0,03
12 Cu	0,530	0,02
13 Na	0,271	0,02
14 Mn	0,261	0,02
15 Sr	0,127	0,01
16 Ni	0,118	0,01
17 Pb	0,117	0,01
18 Cr	0,103	0,01
19 Br	0,098	0,009
20 Zr	0,087	0,009
21 Rb	0,025	0,005

### Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	4,6

17/08/2018 14:03:41

PANalytical

Page 1

17/08/2018 14:06:29

PANalytical

Page 1

## Quantification of sample CaCO3

R.M.S.:	0,001
Result status:	
Sum before normalization:	41,3 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	6,300
Weight after pressing (g):	12,600
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	96,790	0,1
2 Mg	1,312	0,03
3 Si	0,617	0,02
4 Fe	0,501	0,02
5 Al	0,322	0,02
6 K	0,194	0,01
7 Sr	0,092	0,009
8 Cl	0,065	0,008
9 Na	0,036	0,006
10 Ni	0,021	0,004
11 P	0,020	0,004
12 S	0,017	0,004
13 Zn	0,013	0,003

### Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	6,3

## Quantification of sample Quarzsand

R.M.S.:	0,010
Result status:	
Sum before normalization:	38,5 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	4,000
Weight after pressing (g):	8,000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Si	61,170	0,1
2 O	33,385	0,7
3 K	1,667	0,04
4 Al	1,609	0,04
5 Fe	1,236	0,03
6 Ca	0,284	0,02
7 Na	0,195	0,01
8 W	0,113	0,01
9 Mg	0,093	0,009
10 Mn	0,074	0,008
11 Ti	0,066	0,008
12 P	0,057	0,007
13 S	0,018	0,004
14 Zr	0,008	0,003
15 Zn	0,007	0,003
16 Sr	0,007	0,003
17 Rb	0,006	0,002
18 Cu	0,005	0,002

### Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	4,0

## Quantification of sample V1 Ash

R.M.S.:	0,036
Result status:	
Sum before normalization:	77,9 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	2,800
Weight after pressing (g):	5,600
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 O	35,176	0,6
2 Ca	22,398	0,1
3 Si	12,734	0,1
4 P	9,173	0,09
5 Fe	5,386	0,07
6 Al	5,288	0,07
7 Mg	3,477	0,05
8 S	2,539	0,05
9 K	2,269	0,04
10 Ti	0,614	0,02
11 Zn	0,428	0,02
12 Cu	0,190	0,01
13 Mn	0,105	0,01
14 Cr	0,048	0,007
15 Sr	0,041	0,006
16 Ni	0,036	0,006
17 Pb	0,033	0,005
18 Zr	0,028	0,005
19 Sn	0,021	0,004
20 Rb	0,009	0,003
21 Mo	0,004	0,002
22 Br	0,003	0,002
23 Nb	0,002	0,001

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	2,8

## Quantification of sample V1 Bed

R.M.S.:	0,023
Result status:	
Sum before normalization:	29,5 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	4,000
Weight after pressing (g):	8,000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Si	65,456	0,1
2 Ca	11,632	0,1
3 P	6,849	0,08
4 Fe	4,566	0,06
5 K	3,750	0,06
6 Al	3,345	0,05
7 S	1,392	0,04
8 Mg	1,239	0,03
9 Ti	0,453	0,02
10 Na	0,360	0,02
11 Mn	0,177	0,01
12 Zn	0,171	0,01
13 Cl	0,153	0,01
14 W	0,109	0,01
15 Cu	0,099	0,009
16 Cr	0,098	0,009
17 Zr	0,045	0,006
18 Ni	0,040	0,006
19 Sr	0,026	0,005
20 Pb	0,021	0,004
21 Rb	0,019	0,004

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	4,0

## Quantification of sample V2 Ash

R.M.S.:	0,047
Result status:	
Sum before normalization:	59,8 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	2,600
Weight after pressing (g):	5,200
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	38,834	0,1
2 Si	17,564	0,1
3 P	13,394	0,1
4 Fe	10,702	0,09
5 Al	7,013	0,08
6 Mg	5,412	0,07
7 K	3,194	0,05
8 Ti	1,134	0,03
9 Zn	0,735	0,03
10 Na	0,731	0,03
11 Cu	0,349	0,02
12 Mn	0,232	0,01
13 S	0,190	0,01
14 Cr	0,124	0,01
15 Cl	0,089	0,009
16 Sr	0,089	0,009
17 Ni	0,083	0,009
18 Zr	0,058	0,007
19 Sn	0,026	0,005
20 Pb	0,019	0,004
21 Rb	0,017	0,004
22 Mo	0,008	0,003

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	2,6

## Quantification of sample V2 Bed

R.M.S.:	0,019
Result status:	
Sum before normalization:	26,5 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	4,200
Weight after pressing (g):	8,400
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Si	70,097	0,1
2 Ca	9,299	0,09
3 P	5,082	0,07
4 Fe	5,053	0,07
5 K	4,203	0,06
6 Al	3,000	0,05
7 Mg	1,119	0,03
8 Ti	0,383	0,02
9 Cr	0,340	0,02
10 Na	0,316	0,02
11 Mn	0,230	0,01
12 Zn	0,184	0,01
13 W	0,156	0,01
14 S	0,134	0,01
15 Cl	0,129	0,01
16 Cu	0,101	0,010
17 Ni	0,100	0,009
18 Zr	0,035	0,006
19 Sr	0,022	0,004
20 Rb	0,017	0,004

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	4,2

## Quantification of sample V3 Ash

R.M.S.:	0,050
Result status:	
Sum before normalization:	58,5 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3,400
Weight after pressing (g):	6,800
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	39,126	0,1
2 Si	16,553	0,1
3 P	12,859	0,1
4 Fe	10,617	0,09
5 Al	6,531	0,07
6 Mg	4,790	0,06
7 K	3,564	0,06
8 S	1,835	0,04
9 Ti	1,100	0,03
10 Zn	0,889	0,03
11 Na	0,742	0,03
12 Cu	0,399	0,02
13 Mn	0,206	0,01
14 Cl	0,189	0,01
15 Ba	0,131	0,01
16 Cr	0,103	0,01
17 Sr	0,086	0,009
18 Ni	0,080	0,008
19 Sn	0,061	0,007
20 Zr	0,059	0,007
21 As	0,037	0,006
22 Rb	0,017	0,004
23 Bi	0,010	0,003
24 Br	0,008	0,003
25 Mo	0,007	0,003

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	3,4

## Quantification of sample V3 Bed

R.M.S.:	0,248
Result status:	
Sum before normalization:	61,8 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3,700
Weight after pressing (g):	7,400
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	83,630	0,1
2 S	3,280	0,05
3 Si	3,170	0,05
4 Mg	3,100	0,05
5 P	2,314	0,05
6 Fe	1,733	0,04
7 Al	1,448	0,04
8 K	0,494	0,02
9 Ti	0,252	0,02
10 Cl	0,230	0,01
11 Zn	0,101	0,010
12 Sr	0,067	0,008
13 Cu	0,064	0,008
14 Mn	0,042	0,006
15 Cr	0,038	0,006
16 Ni	0,014	0,004
17 Br	0,012	0,003
18 Pb	0,011	0,003

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	3,7

## Quantification of sample V4 Ash

R.M.S.:	0,048
Result status:	
Sum before normalization:	62,1 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	2,800
Weight after pressing (g):	5,600
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	39,358	0,1
2 Si	17,389	0,1
3 P	13,198	0,1
4 Fe	10,269	0,09
5 Al	6,870	0,08
6 Mg	5,470	0,07
7 K	3,537	0,06
8 Ti	1,115	0,03
9 Na	0,744	0,03
10 Zn	0,631	0,02
11 Cu	0,360	0,02
12 S	0,352	0,02
13 Mn	0,217	0,01
14 Cr	0,097	0,009
15 Cl	0,093	0,009
16 Sr	0,086	0,009
17 Ni	0,078	0,008
18 Zr	0,060	0,007
19 Pb	0,034	0,005
20 Sn	0,020	0,004
21 Rb	0,017	0,004
22 Mo	0,006	0,002

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	2,8

## Quantification of sample V4 Bed

R.M.S.:	0,036
Result status:	
Sum before normalization:	63,2 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	4,600
Weight after pressing (g):	9,200
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	90,353	0,1
2 Mg	3,555	0,06
3 Si	1,655	0,04
4 Fe	1,559	0,04
5 P	1,169	0,03
6 Al	0,719	0,03
7 K	0,273	0,02
8 S	0,161	0,01
9 Ti	0,141	0,01
10 Zn	0,124	0,01
11 Cu	0,069	0,008
12 Cl	0,060	0,007
13 Cr	0,058	0,007
14 Mn	0,052	0,007
15 Sr	0,037	0,006
16 Ni	0,015	0,004

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	4,6

## Quantification of sample V5 Ash

R.M.S.:	0,046
Result status:	
Sum before normalization:	62,6 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	2,700
Weight after pressing (g):	5,400
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	36,855	0,1
2 Si	17,591	0,1
3 P	13,647	0,1
4 Fe	9,864	0,09
5 Al	7,116	0,08
6 Mg	4,756	0,06
7 K	3,402	0,05
8 S	2,827	0,05
9 Ti	1,100	0,03
10 Na	0,773	0,03
11 Zn	0,750	0,03
12 Cu	0,363	0,02
13 Cl	0,347	0,02
14 Mn	0,196	0,01
15 Cr	0,097	0,009
16 Sr	0,074	0,008
17 Ni	0,068	0,008
18 Zr	0,055	0,007
19 Pb	0,041	0,006
20 Sn	0,036	0,006
21 Br	0,017	0,004
22 Rb	0,016	0,004
23 Mo	0,006	0,002
24 Co	0,004	0,002

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	2,7

## Quantification of sample V5 Bed

R.M.S.:	0,042
Result status:	
Sum before normalization:	25,1 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	4,400
Weight after pressing (g):	8,800
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Si	57,501	0,1
2 Ca	15,561	0,1
3 P	8,546	0,08
4 Fe	5,176	0,07
5 K	4,241	0,06
6 Al	3,609	0,06
7 Mg	1,778	0,04
8 S	1,542	0,04
9 Ti	0,523	0,02
10 Na	0,412	0,02
11 Cl	0,281	0,02
12 Zn	0,233	0,01
13 Mn	0,186	0,01
14 Cr	0,116	0,01
15 Cu	0,108	0,01
16 W	0,074	0,008
17 Sr	0,032	0,005
18 Ni	0,032	0,005
19 Zr	0,030	0,005
20 Rb	0,021	0,004

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	4,4

## Quantification of sample V6 Ash

R.M.S.:	0,057
Result status:	
Sum before normalization:	60,2 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	2,900
Weight after pressing (g):	5,800
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	38,632	0,1
2 Si	17,684	0,1
3 P	13,565	0,1
4 Fe	10,506	0,09
5 Al	6,934	0,08
6 Mg	5,079	0,07
7 K	3,291	0,05
8 Ti	1,132	0,03
9 Na	0,714	0,03
10 S	0,690	0,02
11 Zn	0,629	0,02
12 Cu	0,377	0,02
13 Mn	0,209	0,01
14 Cl	0,149	0,01
15 Cr	0,116	0,01
16 Sr	0,085	0,009
17 Ni	0,073	0,008
18 Zr	0,058	0,007
19 W	0,030	0,005
20 Rb	0,018	0,004
21 Co	0,015	0,004
22 Pb	0,006	0,002
23 Mo	0,006	0,002

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	2,9

## Quantification of sample V6 Bed

R.M.S.:	0,044
Result status:	
Sum before normalization:	26,7 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	4,500
Weight after pressing (g):	9,000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Si	58,250	0,1
2 Ca	15,963	0,1
3 P	8,272	0,08
4 Fe	5,463	0,07
5 K	4,474	0,06
6 Al	3,530	0,06
7 Mg	1,637	0,04
8 Ti	0,505	0,02
9 Na	0,378	0,02
10 Cr	0,336	0,02
11 S	0,299	0,02
12 Zn	0,240	0,01
13 Mn	0,161	0,01
14 Cl	0,145	0,01
15 Cu	0,123	0,01
16 W	0,085	0,009
17 Zr	0,046	0,006
18 Ni	0,041	0,006
19 Sr	0,034	0,006
20 Rb	0,018	0,004

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	4,5

## Quantification of sample V7 Ash

R.M.S.:	0,057
Result status:	
Sum before normalization:	59,5 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3,300
Weight after pressing (g):	6,600
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	39,057	0,1
2 Si	16,826	0,1
3 P	13,172	0,1
4 Fe	10,187	0,09
5 Al	6,631	0,07
6 Mg	4,807	0,06
7 K	3,481	0,05
8 S	1,850	0,04
9 Ti	1,165	0,03
10 Zn	0,779	0,03
11 Na	0,684	0,02
12 Cl	0,382	0,02
13 Cu	0,370	0,02
14 Mn	0,187	0,01
15 Cr	0,094	0,009
16 Sr	0,079	0,008
17 Ni	0,070	0,008
18 Zr	0,056	0,007
19 Pb	0,052	0,007
20 Br	0,026	0,005
21 Sn	0,024	0,005
22 Rb	0,018	0,004
23 Mo	0,005	0,002

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	3,3

## Quantification of sample V7 Bed

R.M.S.:	0,012
Result status:	
Sum before normalization:	62,7 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3,700
Weight after pressing (g):	7,400
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	84,912	0,1
2 S	3,446	0,05
3 Si	2,691	0,05
4 Mg	2,566	0,05
5 P	1,960	0,04
6 Fe	1,766	0,04
7 Al	1,161	0,03
8 K	0,454	0,02
9 Cl	0,248	0,01
10 Ti	0,203	0,01
11 Zn	0,154	0,01
12 Na	0,115	0,01
13 Cu	0,066	0,008
14 Sr	0,061	0,007
15 Sn	0,058	0,007
16 Mn	0,046	0,006
17 Cr	0,027	0,005
18 Zr	0,020	0,004
19 Br	0,016	0,004
20 Ni	0,015	0,004
21 As	0,015	0,004
22 Pb	0,000	0,000

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	3,7

## Quantification of sample V8 Ash

R.M.S.:	0,066
Result status:	
Sum before normalization:	63,2 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	2,200
Weight after pressing (g):	4,400
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	41,689	0,1
2 Si	16,432	0,1
3 P	13,198	0,1
4 Fe	9,345	0,09
5 Al	6,663	0,07
6 Mg	5,001	0,07
7 K	3,383	0,05
8 Ti	1,030	0,03
9 Na	0,796	0,03
10 S	0,747	0,03
11 Zn	0,685	0,02
12 Cu	0,282	0,02
13 Cl	0,220	0,01
14 Mn	0,196	0,01
15 Cr	0,089	0,009
16 Sr	0,080	0,008
17 Ni	0,073	0,008
18 Zr	0,053	0,007
19 Rb	0,016	0,004
20 Pb	0,010	0,003
21 Br	0,005	0,002
22 Co	0,004	0,002
23 Mo	0,003	0,002

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	2,2

## Quantification of sample V8 Bed

R.M.S.:	0,167
Result status:	
Sum before normalization:	59,5 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	5,500
Weight after pressing (g):	11,000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	84,614	0,1
2 Mg	2,775	0,05
3 Si	2,736	0,05
4 Fe	2,580	0,05
5 S	2,465	0,05
6 P	2,105	0,04
7 Al	1,203	0,03
8 K	0,438	0,02
9 Ti	0,255	0,02
10 Cl	0,213	0,01
11 Zn	0,147	0,01
12 Na	0,127	0,01
13 Sn	0,075	0,008
14 Cr	0,063	0,008
15 Cu	0,062	0,007
16 Sr	0,042	0,006
17 Mn	0,042	0,006
18 Ni	0,026	0,005
19 Zr	0,017	0,004
20 Br	0,008	0,003
21 Pb	0,007	0,003

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	5,5

## Quantification of sample V9 Ash

R.M.S.:	0,073
Result status:	
Sum before normalization:	65,1 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3,300
Weight after pressing (g):	6,600
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	42,656	0,1
2 Si	14,071	0,1
3 P	11,198	0,09
4 Fe	9,184	0,09
5 Al	5,721	0,07
6 Cl	5,693	0,07
7 Mg	4,784	0,06
8 K	2,329	0,05
9 S	1,344	0,03
10 Ti	0,877	0,03
11 Na	0,512	0,02
12 Cr	0,487	0,02
13 Zn	0,443	0,02
14 Mn	0,198	0,01
15 Cu	0,194	0,01
16 Ni	0,138	0,01
17 Sr	0,065	0,008
18 Zr	0,045	0,006
19 Sn	0,028	0,005
20 Pb	0,012	0,003
21 Rb	0,010	0,003
22 Mo	0,007	0,002
23 Br	0,004	0,002

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	3,3

## Quantification of sample V9 Bed

R.M.S.:	0,034
Result status:	
Sum before normalization:	26,3 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	4,700
Weight after pressing (g):	9,400
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Si	58,385	0,1
2 Ca	15,650	0,1
3 Fe	6,856	0,08
4 P	5,051	0,07
5 K	3,382	0,05
6 Al	2,680	0,05
7 Cl	2,557	0,05
8 Cr	1,397	0,04
9 S	1,294	0,03
10 Mg	1,202	0,03
11 Ti	0,317	0,02
12 Na	0,298	0,02
13 Mn	0,259	0,02
14 Ni	0,239	0,01
15 Zn	0,189	0,01
16 W	0,091	0,009
17 Cu	0,077	0,008
18 Sr	0,028	0,005
19 Zr	0,027	0,005
20 Rb	0,021	0,004

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	4,7

## Quantification of sample V10 Ash

R.M.S.:	0,066
Result status:	
Sum before normalization:	65,3 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	2,800
Weight after pressing (g):	5,600
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	45,146	0,1
2 Si	14,988	0,1
3 P	12,031	0,1
4 Fe	8,539	0,08
5 Al	6,082	0,07
6 Mg	5,128	0,07
7 Cl	4,330	0,06
8 K	1,067	0,03
9 Ti	0,925	0,03
10 Na	0,417	0,02
11 Zn	0,355	0,02
12 S	0,244	0,01
13 Cr	0,232	0,01
14 Mn	0,186	0,01
15 Ni	0,104	0,01
16 Cu	0,089	0,009
17 Sr	0,071	0,008
18 Zr	0,046	0,006
19 Mo	0,007	0,003
20 Pb	0,006	0,002
21 Rb	0,004	0,002
22 Br	0,002	0,001

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	2,8

## Quantification of sample V10 Bed

R.M.S.:	0,028
Result status:	
Sum before normalization:	26,1 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	2,900
Weight after pressing (g):	5,800
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Si	56,945	0,1
2 Ca	14,340	0,1
3 Fe	9,263	0,09
4 P	5,064	0,07
5 K	3,673	0,06
6 Al	2,843	0,05
7 Cr	2,514	0,05
8 Cl	1,650	0,04
9 Mg	1,148	0,03
10 Ni	0,823	0,03
11 S	0,346	0,02
12 Ti	0,329	0,02
13 Mn	0,319	0,02
14 Na	0,265	0,02
15 Zn	0,229	0,01
16 W	0,102	0,010
17 Cu	0,064	0,008
18 Sr	0,031	0,005
19 Zr	0,026	0,005
20 Rb	0,017	0,004
21 Mo	0,010	0,003

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	2,9

## Quantification of sample V11 Ash

R.M.S.:	0,052
Result status:	
Sum before normalization:	40,0 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3,250
Weight after pressing (g):	6,500
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	47,718	0,1
2 Si	14,583	0,1
3 P	11,041	0,09
4 Fe	9,221	0,09
5 Al	5,284	0,07
6 Cl	4,129	0,06
7 Mg	3,900	0,06
8 K	1,180	0,03
9 Ti	0,973	0,03
10 S	0,556	0,02
11 Na	0,328	0,02
12 Zn	0,293	0,02
13 Cr	0,222	0,01
14 Mn	0,177	0,01
15 Cu	0,171	0,01
16 Sr	0,084	0,009
17 Ni	0,075	0,008
18 Zr	0,053	0,007
19 Rb	0,005	0,002
20 Co	0,004	0,002
21 Br	0,003	0,002

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	3,25

## Quantification of sample V11 Bed

R.M.S.:	0,044
Result status:	
Sum before normalization:	57,8 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3,800
Weight after pressing (g):	7,600
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	89,944	0,1
2 Fe	1,873	0,04
3 Cl	1,866	0,04
4 Mg	1,774	0,04
5 Cr	1,399	0,04
6 Si	0,817	0,03
7 S	0,737	0,03
8 P	0,420	0,02
9 Al	0,313	0,02
10 K	0,285	0,02
11 Zn	0,124	0,01
12 Mn	0,123	0,01
13 Ti	0,068	0,008
14 Ni	0,067	0,008
15 Sr	0,065	0,008
16 Na	0,058	0,007
17 Cu	0,049	0,007
18 Pb	0,014	0,004
19 Br	0,005	0,002

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	3,8

## Quantification of sample V12 Ash

R.M.S.:	0,052
Result status:	
Sum before normalization:	65,5 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	4,400
Weight after pressing (g):	8,800
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	47,400	0,1
2 Si	14,008	0,1
3 P	11,248	0,09
4 Fe	8,330	0,08
5 Al	5,623	0,07
6 Mg	4,913	0,06
7 Cl	4,395	0,06
8 K	1,353	0,03
9 Ti	0,901	0,03
10 Zn	0,549	0,02
11 S	0,521	0,02
12 Cr	0,216	0,01
13 Mn	0,171	0,01
14 Cu	0,125	0,01
15 Sr	0,088	0,009
16 Ni	0,081	0,009
17 Zr	0,047	0,006
18 Ru	0,007	0,002
19 Rh	0,006	0,002
20 Mo	0,006	0,002
21 Rb	0,006	0,002
22 Br	0,006	0,002
23 Co	0,003	0,002
24 Na	0,000	

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	4,4

## Quantification of sample V12 Bed

R.M.S.:	0,065
Result status:	
Sum before normalization:	63,7 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	4,200
Weight after pressing (g):	8,400
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	89,559	0,1
2 Cl	2,901	0,05
3 Mg	2,097	0,04
4 Fe	1,455	0,04
5 Si	0,981	0,03
6 S	0,745	0,03
7 P	0,549	0,02
8 Cr	0,467	0,02
9 Al	0,363	0,02
10 K	0,341	0,02
11 Zn	0,117	0,01
12 Ti	0,080	0,008
13 Mn	0,070	0,008
14 Cu	0,070	0,008
15 Na	0,057	0,007
16 Sr	0,053	0,007
17 Ni	0,052	0,007
18 Sn	0,017	0,004
19 Pb	0,014	0,003
20 Br	0,007	0,003
21 Mo	0,003	0,002

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	4,2

## Quantification of sample V13 Ash

R.M.S.:	0,103
Result status:	
Sum before normalization:	68,4 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3,100
Weight after pressing (g):	6,200
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	41,964	0,1
2 Si	13,904	0,1
3 P	11,188	0,09
4 Fe	9,301	0,09
5 Cl	7,094	0,08
6 Al	5,781	0,07
7 Mg	4,842	0,06
8 K	1,978	0,04
9 Cr	0,865	0,03
10 Ti	0,849	0,03
11 S	0,602	0,02
12 Na	0,478	0,02
13 Zn	0,336	0,02
14 Ni	0,272	0,02
15 Mn	0,261	0,02
16 Cu	0,155	0,01
17 Sr	0,061	0,007
18 Zr	0,041	0,006
19 Br	0,009	0,003
20 Mo	0,009	0,003
21 Rb	0,008	0,003
22 Co	0,002	0,001

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	3,1

## Quantification of sample V13 Bed

R.M.S.:	0,007
Result status:	
Sum before normalization:	38,7 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3,500
Weight after pressing (g):	7,000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Si	80,503	0,1
2 Ca	5,891	0,07
3 Fe	2,763	0,05
4 K	2,441	0,05
5 P	2,340	0,05
6 Al	2,170	0,04
7 Cl	1,419	0,04
8 Mg	0,661	0,02
9 Cr	0,359	0,02
10 S	0,316	0,02
11 Na	0,297	0,02
12 W	0,277	0,02
13 Ti	0,165	0,01
14 Ni	0,106	0,01
15 Mn	0,101	0,010
16 Zn	0,092	0,009
17 Cu	0,054	0,007
18 Zr	0,019	0,004
19 Sr	0,015	0,004
20 Rb	0,009	0,003

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	3,5

## Quantification of sample V14 Ash

R.M.S.:	0,069
Result status:	
Sum before normalization:	66,5 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	2,600
Weight after pressing (g):	5,200
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	46,091	0,1
2 Si	14,721	0,1
3 P	11,609	0,1
4 Fe	7,676	0,08
5 Al	5,859	0,07
6 Cl	5,745	0,07
7 Mg	4,863	0,06
8 Ti	0,897	0,03
9 S	0,751	0,03
10 K	0,731	0,03
11 Na	0,277	0,02
12 Cu	0,190	0,01
13 Mn	0,187	0,01
14 Zn	0,113	0,01
15 Cr	0,099	0,009
16 Ni	0,080	0,008
17 Sr	0,063	0,008
18 Zr	0,045	0,006
19 Rb	0,004	0,002

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	2,6

## Quantification of sample V14 Bed

R.M.S.:	0,035
Result status:	
Sum before normalization:	26,9 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	4,000
Weight after pressing (g):	8,000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Si	59,534	0,1
2 Ca	16,497	0,1
3 P	6,103	0,07
4 Fe	5,711	0,07
5 K	3,314	0,05
6 Al	2,893	0,05
7 Cl	2,184	0,04
8 Mg	1,341	0,03
9 Cr	0,644	0,02
10 Ti	0,370	0,02
11 Ni	0,318	0,02
12 S	0,264	0,02
13 Mn	0,246	0,01
14 Na	0,233	0,01
15 W	0,107	0,01
16 Zn	0,096	0,009
17 Cu	0,069	0,008
18 Zr	0,029	0,005
19 Sr	0,028	0,005
20 Rb	0,019	0,004

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	4,0

## Quantification of sample V15 Ash

R.M.S.:	0,070
Result status:	
Sum before normalization:	65,7 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	2,350
Weight after pressing (g):	4,700
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	45,250	0,1
2 Si	14,214	0,1
3 P	11,304	0,09
4 Fe	8,222	0,08
5 Al	5,771	0,07
6 Mg	5,004	0,07
7 Cl	4,405	0,06
8 K	2,160	0,04
9 S	1,028	0,03
10 Ti	0,880	0,03
11 Na	0,561	0,02
12 Zn	0,487	0,02
13 Cu	0,208	0,01
14 Mn	0,155	0,01
15 Cr	0,127	0,01
16 Sr	0,078	0,008
17 Ni	0,062	0,007
18 Zr	0,044	0,006
19 Pb	0,012	0,003
20 Rb	0,011	0,003
21 Co	0,009	0,003
22 Br	0,004	0,002
23 Mo	0,004	0,002

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	2,35

## Quantification of sample V15 Bed

R.M.S.:	0,049
Result status:	
Sum before normalization:	58,1 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3,200
Weight after pressing (g):	6,400
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	91,808	0,1
2 Cl	2,878	0,05
3 Mg	1,679	0,04
4 Fe	0,793	0,03
5 S	0,760	0,03
6 Si	0,638	0,02
7 K	0,335	0,02
8 P	0,329	0,02
9 Al	0,265	0,02
10 Cr	0,121	0,01
11 Zn	0,085	0,009
12 Sr	0,071	0,008
13 Ti	0,064	0,008
14 Na	0,053	0,007
15 Cu	0,036	0,006
16 Ni	0,031	0,005
17 Mn	0,027	0,005
18 Br	0,013	0,003
19 Pb	0,013	0,003

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	3,2

## Quantification of sample V16 Ash

R.M.S.:	0,082
Result status:	
Sum before normalization:	65,9 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	2,500
Weight after pressing (g):	5,000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	48,468	0,1
2 Si	13,095	0,1
3 P	9,581	0,09
4 Fe	8,989	0,09
5 Cl	5,059	0,07
6 Al	5,050	0,07
7 Mg	4,371	0,06
8 K	1,286	0,03
9 Cr	1,181	0,03
10 S	0,822	0,03
11 Ti	0,773	0,03
12 Na	0,410	0,02
13 Mn	0,216	0,01
14 Zn	0,192	0,01
15 Cu	0,185	0,01
16 Ni	0,172	0,01
17 Sr	0,083	0,009
18 Zr	0,040	0,006
19 Mo	0,008	0,003
20 Co	0,007	0,002
21 Br	0,006	0,002
22 Rb	0,005	0,002

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	2,5

## Quantification of sample V16 Bed

R.M.S.:	0,093
Result status:	
Sum before normalization:	61,8 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	4,900
Weight after pressing (g):	9,800
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	89,406	0,1
2 Cl	3,287	0,05
3 Fe	2,057	0,04
4 Mg	1,452	0,04
5 S	1,262	0,03
6 Cr	0,651	0,02
7 Si	0,543	0,02
8 K	0,370	0,02
9 P	0,269	0,02
10 Al	0,230	0,01
11 Mn	0,098	0,009
12 Ni	0,078	0,008
13 Zn	0,078	0,008
14 Sr	0,052	0,007
15 Na	0,051	0,007
16 Ti	0,050	0,007
17 Cu	0,050	0,007
18 Br	0,009	0,003
19 Pb	0,008	0,003

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	4,9

## Quantification of sample KS Pellets

R.M.S.:	0,007
Result status:	
Sum before normalization:	27,7 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	4,600
Weight after pressing (g):	9,200
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	42,466	0,1
2 Fe	13,197	0,1
3 Cl	12,363	0,1
4 Si	8,280	0,08
5 P	7,247	0,08
6 S	4,260	0,06
7 Al	2,956	0,05
8 K	2,865	0,05
9 Mg	2,112	0,04
10 Zn	1,275	0,03
11 Ti	1,243	0,03
12 Cu	0,530	0,02
13 Na	0,271	0,02
14 Mn	0,261	0,02
15 Sr	0,127	0,01
16 Ni	0,118	0,01
17 Pb	0,117	0,01
18 Cr	0,103	0,01
19 Br	0,098	0,009
20 Zr	0,087	0,009
21 Rb	0,025	0,005

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	4,6

## Quantification of sample Quarzsand

R.M.S.:	0,010
Result status:	
Sum before normalization:	38,5 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	4,000
Weight after pressing (g):	8,000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Si	61,170	0,1
2 O	33,385	0,7
3 K	1,667	0,04
4 Al	1,609	0,04
5 Fe	1,236	0,03
6 Ca	0,284	0,02
7 Na	0,195	0,01
8 W	0,113	0,01
9 Mg	0,093	0,009
10 Mn	0,074	0,008
11 Ti	0,065	0,008
12 P	0,057	0,007
13 S	0,018	0,004
14 Zr	0,008	0,003
15 Zn	0,007	0,003
16 Sr	0,007	0,003
17 Rb	0,006	0,002
18 Cu	0,005	0,002

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	4,0

## Quantification of sample CaCO3

R.M.S.:	0,001
Result status:	
Sum before normalization:	41,3 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	6,300
Weight after pressing (g):	12,600
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	96,790	0,1
2 Mg	1,312	0,03
3 Si	0,617	0,02
4 Fe	0,501	0,02
5 Al	0,322	0,02
6 K	0,194	0,01
7 Sr	0,092	0,009
8 Cl	0,065	0,008
9 Na	0,036	0,006
10 Ni	0,021	0,004
11 P	0,020	0,004
12 S	0,017	0,004
13 Zn	0,013	0,003

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	6,3

## Quantification of sample V1 Ash

R.M.S.:	0,036
Result status:	
Sum before normalization:	77,9 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	2,800
Weight after pressing (g):	5,600
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 O	35,176	0,6
2 Ca	22,398	0,1
3 Si	12,734	0,1
4 P	9,173	0,09
5 Fe	5,386	0,07
6 Al	5,288	0,07
7 Mg	3,477	0,05
8 S	2,539	0,05
9 K	2,269	0,04
10 Ti	0,614	0,02
11 Zn	0,428	0,02
12 Cu	0,190	0,01
13 Mn	0,105	0,01
14 Cr	0,048	0,007
15 Sr	0,041	0,006
16 Ni	0,036	0,006
17 Pb	0,033	0,005
18 Zr	0,028	0,005
19 Sn	0,021	0,004
20 Rb	0,009	0,003
21 Mo	0,004	0,002
22 Br	0,003	0,002
23 Nb	0,002	0,001

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	2,8

## Quantification of sample V1 Bed

R.M.S.:	0,023
Result status:	
Sum before normalization:	29,5 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	4,000
Weight after pressing (g):	8,000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Si	65,456	0,1
2 Ca	11,632	0,1
3 P	6,849	0,08
4 Fe	4,566	0,06
5 K	3,750	0,06
6 Al	3,345	0,05
7 S	1,392	0,04
8 Mg	1,239	0,03
9 Ti	0,453	0,02
10 Na	0,360	0,02
11 Mn	0,177	0,01
12 Zn	0,171	0,01
13 Cl	0,153	0,01
14 W	0,109	0,01
15 Cu	0,099	0,009
16 Cr	0,098	0,009
17 Zr	0,045	0,006
18 Ni	0,040	0,006
19 Sr	0,026	0,005
20 Pb	0,021	0,004
21 Rb	0,019	0,004

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	4,0

## Quantification of sample V2 Ash

R.M.S.:	0,047
Result status:	
Sum before normalization:	59,8 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	2,600
Weight after pressing (g):	5,200
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	38,834	0,1
2 Si	17,564	0,1
3 P	13,394	0,1
4 Fe	10,702	0,09
5 Al	7,013	0,08
6 Mg	5,412	0,07
7 K	3,194	0,05
8 Ti	1,134	0,03
9 Zn	0,735	0,03
10 Na	0,731	0,03
11 Cu	0,349	0,02
12 Mn	0,232	0,01
13 S	0,190	0,01
14 Cr	0,124	0,01
15 Cl	0,089	0,009
16 Sr	0,089	0,009
17 Ni	0,083	0,009
18 Zr	0,058	0,007
19 Sn	0,026	0,005
20 Pb	0,019	0,004
21 Rb	0,017	0,004
22 Mo	0,008	0,003

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	2,6

## Quantification of sample V2 Bed

R.M.S.:	0,019
Result status:	
Sum before normalization:	26,5 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	4,200
Weight after pressing (g):	8,400
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Si	70,097	0,1
2 Ca	9,299	0,09
3 P	5,082	0,07
4 Fe	5,053	0,07
5 K	4,203	0,06
6 Al	3,000	0,05
7 Mg	1,119	0,03
8 Ti	0,383	0,02
9 Cr	0,340	0,02
10 Na	0,316	0,02
11 Mn	0,230	0,01
12 Zn	0,184	0,01
13 W	0,156	0,01
14 S	0,134	0,01
15 Cl	0,129	0,01
16 Cu	0,101	0,010
17 Ni	0,100	0,009
18 Zr	0,035	0,006
19 Sr	0,022	0,004
20 Rb	0,017	0,004

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	4,2

## Quantification of sample V3 Ash

R.M.S.:	0,050
Result status:	
Sum before normalization:	58,5 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3,400
Weight after pressing (g):	6,800
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	39,126	0,1
2 Si	16,553	0,1
3 P	12,859	0,1
4 Fe	10,617	0,09
5 Al	6,531	0,07
6 Mg	4,790	0,06
7 K	3,564	0,06
8 S	1,835	0,04
9 Ti	1,100	0,03
10 Zn	0,889	0,03
11 Na	0,742	0,03
12 Cu	0,399	0,02
13 Mn	0,206	0,01
14 Cl	0,189	0,01
15 Ba	0,131	0,01
16 Cr	0,103	0,01
17 Sr	0,086	0,009
18 Ni	0,080	0,008
19 Sn	0,061	0,007
20 Zr	0,059	0,007
21 As	0,037	0,006
22 Rb	0,017	0,004
23 Bi	0,010	0,003
24 Br	0,008	0,003
25 Mo	0,007	0,003

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	3,4

## Quantification of sample V3 Bed

R.M.S.:	0,248
Result status:	
Sum before normalization:	61,8 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3,700
Weight after pressing (g):	7,400
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	83,630	0,1
2 S	3,280	0,05
3 Si	3,170	0,05
4 Mg	3,100	0,05
5 P	2,314	0,05
6 Fe	1,733	0,04
7 Al	1,448	0,04
8 K	0,494	0,02
9 Ti	0,252	0,02
10 Cl	0,230	0,01
11 Zn	0,101	0,010
12 Sr	0,067	0,008
13 Cu	0,064	0,008
14 Mn	0,042	0,006
15 Cr	0,038	0,006
16 Ni	0,014	0,004
17 Br	0,012	0,003
18 Pb	0,011	0,003

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	3,7

## Quantification of sample V4 Ash

R.M.S.:	0,048
Result status:	
Sum before normalization:	62,1 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	2,800
Weight after pressing (g):	5,600
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	39,358	0,1
2 Si	17,389	0,1
3 P	13,198	0,1
4 Fe	10,269	0,09
5 Al	6,870	0,08
6 Mg	5,470	0,07
7 K	3,537	0,06
8 Ti	1,115	0,03
9 Na	0,744	0,03
10 Zn	0,631	0,02
11 Cu	0,360	0,02
12 S	0,352	0,02
13 Mn	0,217	0,01
14 Cr	0,097	0,009
15 Cl	0,093	0,009
16 Sr	0,086	0,009
17 Ni	0,078	0,008
18 Zr	0,060	0,007
19 Pb	0,034	0,005
20 Sn	0,020	0,004
21 Rb	0,017	0,004
22 Mo	0,006	0,002

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	2,8

## Quantification of sample V4 Bed

R.M.S.:	0,036
Result status:	
Sum before normalization:	63,2 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	4,600
Weight after pressing (g):	9,200
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	90,353	0,1
2 Mg	3,555	0,06
3 Si	1,655	0,04
4 Fe	1,559	0,04
5 P	1,169	0,03
6 Al	0,719	0,03
7 K	0,273	0,02
8 S	0,161	0,01
9 Ti	0,141	0,01
10 Zn	0,124	0,01
11 Cu	0,069	0,008
12 Cl	0,060	0,007
13 Cr	0,058	0,007
14 Mn	0,052	0,007
15 Sr	0,037	0,006
16 Ni	0,015	0,004

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	4,6

## Quantification of sample V5 Ash

R.M.S.:	0,046
Result status:	
Sum before normalization:	62,6 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	2,700
Weight after pressing (g):	5,400
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	36,855	0,1
2 Si	17,591	0,1
3 P	13,647	0,1
4 Fe	9,864	0,09
5 Al	7,116	0,08
6 Mg	4,756	0,06
7 K	3,402	0,05
8 S	2,827	0,05
9 Ti	1,100	0,03
10 Na	0,773	0,03
11 Zn	0,750	0,03
12 Cu	0,363	0,02
13 Cl	0,347	0,02
14 Mn	0,196	0,01
15 Cr	0,097	0,009
16 Sr	0,074	0,008
17 Ni	0,068	0,008
18 Zr	0,055	0,007
19 Pb	0,041	0,006
20 Sn	0,036	0,006
21 Br	0,017	0,004
22 Rb	0,016	0,004
23 Mo	0,006	0,002
24 Co	0,004	0,002

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	2,7

## Quantification of sample V5 Bed

R.M.S.:	0,042
Result status:	
Sum before normalization:	25,1 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	4,400
Weight after pressing (g):	8,800
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Si	57,501	0,1
2 Ca	15,561	0,1
3 P	8,546	0,08
4 Fe	5,176	0,07
5 K	4,241	0,06
6 Al	3,609	0,06
7 Mg	1,778	0,04
8 S	1,542	0,04
9 Ti	0,523	0,02
10 Na	0,412	0,02
11 Cl	0,281	0,02
12 Zn	0,233	0,01
13 Mn	0,186	0,01
14 Cr	0,116	0,01
15 Cu	0,108	0,01
16 W	0,074	0,008
17 Sr	0,032	0,005
18 Ni	0,032	0,005
19 Zr	0,030	0,005
20 Rb	0,021	0,004

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	4,4

## Quantification of sample V6 Ash

R.M.S.:	0,057
Result status:	
Sum before normalization:	60,2 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	2,900
Weight after pressing (g):	5,800
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	38,632	0,1
2 Si	17,684	0,1
3 P	13,565	0,1
4 Fe	10,506	0,09
5 Al	6,934	0,08
6 Mg	5,079	0,07
7 K	3,291	0,05
8 Ti	1,132	0,03
9 Na	0,714	0,03
10 S	0,690	0,02
11 Zn	0,629	0,02
12 Cu	0,377	0,02
13 Mn	0,209	0,01
14 Cl	0,149	0,01
15 Cr	0,116	0,01
16 Sr	0,085	0,009
17 Ni	0,073	0,008
18 Zr	0,058	0,007
19 W	0,030	0,005
20 Rb	0,018	0,004
21 Co	0,015	0,004
22 Pb	0,006	0,002
23 Mo	0,006	0,002

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	2,9

## Quantification of sample V6 Bed

R.M.S.:	0,044
Result status:	
Sum before normalization:	26,7 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	4,500
Weight after pressing (g):	9,000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Si	58,250	0,1
2 Ca	15,963	0,1
3 P	8,272	0,08
4 Fe	5,463	0,07
5 K	4,474	0,06
6 Al	3,530	0,06
7 Mg	1,637	0,04
8 Ti	0,505	0,02
9 Na	0,378	0,02
10 Cr	0,336	0,02
11 S	0,299	0,02
12 Zn	0,240	0,01
13 Mn	0,161	0,01
14 Cl	0,145	0,01
15 Cu	0,123	0,01
16 W	0,085	0,009
17 Zr	0,046	0,006
18 Ni	0,041	0,006
19 Sr	0,034	0,006
20 Rb	0,018	0,004

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	4,5

## Quantification of sample V7 Ash

R.M.S.:	0,057
Result status:	
Sum before normalization:	59,5 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3,300
Weight after pressing (g):	6,600
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	39,057	0,1
2 Si	16,826	0,1
3 P	13,172	0,1
4 Fe	10,187	0,09
5 Al	6,631	0,07
6 Mg	4,807	0,06
7 K	3,481	0,05
8 S	1,850	0,04
9 Ti	1,165	0,03
10 Zn	0,779	0,03
11 Na	0,684	0,02
12 Cl	0,382	0,02
13 Cu	0,370	0,02
14 Mn	0,187	0,01
15 Cr	0,094	0,009
16 Sr	0,079	0,008
17 Ni	0,070	0,008
18 Zr	0,056	0,007
19 Pb	0,052	0,007
20 Br	0,026	0,005
21 Sn	0,024	0,005
22 Rb	0,018	0,004
23 Mo	0,005	0,002

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	3,3

## Quantification of sample V7 Bed

R.M.S.:	0,012
Result status:	
Sum before normalization:	62,7 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3,700
Weight after pressing (g):	7,400
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	84,912	0,1
2 S	3,446	0,05
3 Si	2,691	0,05
4 Mg	2,566	0,05
5 P	1,960	0,04
6 Fe	1,766	0,04
7 Al	1,161	0,03
8 K	0,454	0,02
9 Cl	0,248	0,01
10 Ti	0,203	0,01
11 Zn	0,154	0,01
12 Na	0,115	0,01
13 Cu	0,066	0,008
14 Sr	0,061	0,007
15 Sn	0,058	0,007
16 Mn	0,046	0,006
17 Cr	0,027	0,005
18 Zr	0,020	0,004
19 Br	0,016	0,004
20 Ni	0,015	0,004
21 As	0,015	0,004
22 Pb	0,000	0,000

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	3,7

## Quantification of sample V8 Ash

R.M.S.:	0,066
Result status:	
Sum before normalization:	63,2 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	2,200
Weight after pressing (g):	4,400
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	41,689	0,1
2 Si	16,432	0,1
3 P	13,198	0,1
4 Fe	9,345	0,09
5 Al	6,663	0,07
6 Mg	5,001	0,07
7 K	3,383	0,05
8 Ti	1,030	0,03
9 Na	0,796	0,03
10 S	0,747	0,03
11 Zn	0,685	0,02
12 Cu	0,282	0,02
13 Cl	0,220	0,01
14 Mn	0,196	0,01
15 Cr	0,089	0,009
16 Sr	0,080	0,008
17 Ni	0,073	0,008
18 Zr	0,053	0,007
19 Rb	0,016	0,004
20 Pb	0,010	0,003
21 Br	0,005	0,002
22 Co	0,004	0,002
23 Mo	0,003	0,002

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	2,2

## Quantification of sample V8 Bed

R.M.S.:	0,167
Result status:	
Sum before normalization:	59,5 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	5,500
Weight after pressing (g):	11,000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	84,614	0,1
2 Mg	2,775	0,05
3 Si	2,736	0,05
4 Fe	2,580	0,05
5 S	2,465	0,05
6 P	2,105	0,04
7 Al	1,203	0,03
8 K	0,438	0,02
9 Ti	0,255	0,02
10 Cl	0,213	0,01
11 Zn	0,147	0,01
12 Na	0,127	0,01
13 Sn	0,075	0,008
14 Cr	0,063	0,008
15 Cu	0,062	0,007
16 Sr	0,042	0,006
17 Mn	0,042	0,006
18 Ni	0,026	0,005
19 Zr	0,017	0,004
20 Br	0,008	0,003
21 Pb	0,007	0,003

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	5,5

## Quantification of sample V9 Ash

R.M.S.:	0,073
Result status:	
Sum before normalization:	65,1 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3,300
Weight after pressing (g):	6,600
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	42,656	0,1
2 Si	14,071	0,1
3 P	11,198	0,09
4 Fe	9,184	0,09
5 Al	5,721	0,07
6 Cl	5,693	0,07
7 Mg	4,784	0,06
8 K	2,329	0,05
9 S	1,344	0,03
10 Ti	0,877	0,03
11 Na	0,512	0,02
12 Cr	0,487	0,02
13 Zn	0,443	0,02
14 Mn	0,198	0,01
15 Cu	0,194	0,01
16 Ni	0,138	0,01
17 Sr	0,065	0,008
18 Zr	0,045	0,006
19 Sn	0,028	0,005
20 Pb	0,012	0,003
21 Rb	0,010	0,003
22 Mo	0,007	0,002
23 Br	0,004	0,002

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	3,3

## Quantification of sample V9 Bed

R.M.S.:	0,034
Result status:	
Sum before normalization:	26,3 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	4,700
Weight after pressing (g):	9,400
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Si	58,385	0,1
2 Ca	15,650	0,1
3 Fe	6,856	0,08
4 P	5,051	0,07
5 K	3,382	0,05
6 Al	2,680	0,05
7 Cl	2,557	0,05
8 Cr	1,397	0,04
9 S	1,294	0,03
10 Mg	1,202	0,03
11 Ti	0,317	0,02
12 Na	0,298	0,02
13 Mn	0,259	0,02
14 Ni	0,239	0,01
15 Zn	0,189	0,01
16 W	0,091	0,009
17 Cu	0,077	0,008
18 Sr	0,028	0,005
19 Zr	0,027	0,005
20 Rb	0,021	0,004

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	4,7

## Quantification of sample V10 Ash

R.M.S.:	0,066
Result status:	
Sum before normalization:	65,3 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	2,800
Weight after pressing (g):	5,600
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	45,146	0,1
2 Si	14,988	0,1
3 P	12,031	0,1
4 Fe	8,539	0,08
5 Al	6,082	0,07
6 Mg	5,128	0,07
7 Cl	4,330	0,06
8 K	1,067	0,03
9 Ti	0,925	0,03
10 Na	0,417	0,02
11 Zn	0,355	0,02
12 S	0,244	0,01
13 Cr	0,232	0,01
14 Mn	0,186	0,01
15 Ni	0,104	0,01
16 Cu	0,089	0,009
17 Sr	0,071	0,008
18 Zr	0,046	0,006
19 Mo	0,007	0,003
20 Pb	0,006	0,002
21 Rb	0,004	0,002
22 Br	0,002	0,001

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	2,8

## Quantification of sample V10 Bed

R.M.S.:	0,028
Result status:	
Sum before normalization:	26,1 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	2,900
Weight after pressing (g):	5,800
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Si	56,945	0,1
2 Ca	14,340	0,1
3 Fe	9,263	0,09
4 P	5,064	0,07
5 K	3,673	0,06
6 Al	2,843	0,05
7 Cr	2,514	0,05
8 Cl	1,650	0,04
9 Mg	1,148	0,03
10 Ni	0,823	0,03
11 S	0,346	0,02
12 Ti	0,329	0,02
13 Mn	0,319	0,02
14 Na	0,265	0,02
15 Zn	0,229	0,01
16 W	0,102	0,010
17 Cu	0,064	0,008
18 Sr	0,031	0,005
19 Zr	0,026	0,005
20 Rb	0,017	0,004
21 Mo	0,010	0,003

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	2,9

## Quantification of sample V11 Ash

R.M.S.:	0,052
Result status:	
Sum before normalization:	40,0 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3,250
Weight after pressing (g):	6,500
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	47,718	0,1
2 Si	14,583	0,1
3 P	11,041	0,09
4 Fe	9,221	0,09
5 Al	5,284	0,07
6 Cl	4,129	0,06
7 Mg	3,900	0,06
8 K	1,180	0,03
9 Ti	0,973	0,03
10 S	0,556	0,02
11 Na	0,328	0,02
12 Zn	0,293	0,02
13 Cr	0,222	0,01
14 Mn	0,177	0,01
15 Cu	0,171	0,01
16 Sr	0,084	0,009
17 Ni	0,075	0,008
18 Zr	0,053	0,007
19 Rb	0,005	0,002
20 Co	0,004	0,002
21 Br	0,003	0,002

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	3,25

## Quantification of sample V11 Bed

R.M.S.:	0,044
Result status:	
Sum before normalization:	57,8 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3,800
Weight after pressing (g):	7,600
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	89,944	0,1
2 Fe	1,873	0,04
3 Cl	1,866	0,04
4 Mg	1,774	0,04
5 Cr	1,399	0,04
6 Si	0,817	0,03
7 S	0,737	0,03
8 P	0,420	0,02
9 Al	0,313	0,02
10 K	0,285	0,02
11 Zn	0,124	0,01
12 Mn	0,123	0,01
13 Ti	0,068	0,008
14 Ni	0,067	0,008
15 Sr	0,065	0,008
16 Na	0,058	0,007
17 Cu	0,049	0,007
18 Pb	0,014	0,004
19 Br	0,005	0,002

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	3,8

## Quantification of sample V12 Ash

R.M.S.:	0,052
Result status:	
Sum before normalization:	65,5 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	4,400
Weight after pressing (g):	8,800
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	47,400	0,1
2 Si	14,008	0,1
3 P	11,248	0,09
4 Fe	8,330	0,08
5 Al	5,623	0,07
6 Mg	4,913	0,06
7 Cl	4,395	0,06
8 K	1,353	0,03
9 Ti	0,901	0,03
10 Zn	0,549	0,02
11 S	0,521	0,02
12 Cr	0,216	0,01
13 Mn	0,171	0,01
14 Cu	0,125	0,01
15 Sr	0,088	0,009
16 Ni	0,081	0,009
17 Zr	0,047	0,006
18 Ru	0,007	0,002
19 Rh	0,006	0,002
20 Mo	0,006	0,002
21 Rb	0,006	0,002
22 Br	0,006	0,002
23 Co	0,003	0,002
24 Na	0,000	0,000

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	4,4

## Quantification of sample V12 Bed

R.M.S.:	0,065
Result status:	
Sum before normalization:	63,7 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	4,200
Weight after pressing (g):	8,400
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	89,559	0,1
2 Cl	2,901	0,05
3 Mg	2,097	0,04
4 Fe	1,455	0,04
5 Si	0,981	0,03
6 S	0,745	0,03
7 P	0,549	0,02
8 Cr	0,467	0,02
9 Al	0,363	0,02
10 K	0,341	0,02
11 Zn	0,117	0,01
12 Ti	0,080	0,008
13 Mn	0,070	0,008
14 Cu	0,070	0,008
15 Na	0,057	0,007
16 Sr	0,053	0,007
17 Ni	0,052	0,007
18 Sn	0,017	0,004
19 Pb	0,014	0,003
20 Br	0,007	0,003
21 Mo	0,003	0,002

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	4,2

## Quantification of sample V13 Ash

R.M.S.:	0,103
Result status:	
Sum before normalization:	68,4 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3,100
Weight after pressing (g):	6,200
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	41,964	0,1
2 Si	13,904	0,1
3 P	11,188	0,09
4 Fe	9,301	0,09
5 Cl	7,094	0,08
6 Al	5,781	0,07
7 Mg	4,842	0,06
8 K	1,978	0,04
9 Cr	0,865	0,03
10 Ti	0,849	0,03
11 S	0,602	0,02
12 Na	0,478	0,02
13 Zn	0,336	0,02
14 Ni	0,272	0,02
15 Mn	0,261	0,02
16 Cu	0,155	0,01
17 Sr	0,061	0,007
18 Zr	0,041	0,006
19 Br	0,009	0,003
20 Mo	0,009	0,003
21 Rb	0,008	0,003
22 Co	0,002	0,001

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	3,1

## Quantification of sample V13 Bed

R.M.S.:	0,007
Result status:	
Sum before normalization:	38,7 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3,500
Weight after pressing (g):	7,000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Si	80,503	0,1
2 Ca	5,891	0,07
3 Fe	2,763	0,05
4 K	2,441	0,05
5 P	2,340	0,05
6 Al	2,170	0,04
7 Cl	1,419	0,04
8 Mg	0,661	0,02
9 Cr	0,359	0,02
10 S	0,316	0,02
11 Na	0,297	0,02
12 W	0,277	0,02
13 Ti	0,165	0,01
14 Ni	0,106	0,01
15 Mn	0,101	0,010
16 Zn	0,092	0,009
17 Cu	0,054	0,007
18 Zr	0,019	0,004
19 Sr	0,015	0,004
20 Rb	0,009	0,003

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	3,5

## Quantification of sample V14 Ash

R.M.S.:	0,069
Result status:	
Sum before normalization:	66,5 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	2,600
Weight after pressing (g):	5,200
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	46,091	0,1
2 Si	14,721	0,1
3 P	11,609	0,1
4 Fe	7,676	0,08
5 Al	5,859	0,07
6 Cl	5,745	0,07
7 Mg	4,863	0,06
8 Ti	0,897	0,03
9 S	0,751	0,03
10 K	0,731	0,03
11 Na	0,277	0,02
12 Cu	0,190	0,01
13 Mn	0,187	0,01
14 Zn	0,113	0,01
15 Cr	0,099	0,009
16 Ni	0,080	0,008
17 Sr	0,063	0,008
18 Zr	0,045	0,006
19 Rb	0,004	0,002

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	2,6

## Quantification of sample V14 Bed

R.M.S.:	0,035
Result status:	
Sum before normalization:	26,9 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	4,000
Weight after pressing (g):	8,000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Si	59,534	0,1
2 Ca	16,497	0,1
3 P	6,103	0,07
4 Fe	5,711	0,07
5 K	3,314	0,05
6 Al	2,893	0,05
7 Cl	2,184	0,04
8 Mg	1,341	0,03
9 Cr	0,644	0,02
10 Ti	0,370	0,02
11 Ni	0,318	0,02
12 S	0,264	0,02
13 Mn	0,246	0,01
14 Na	0,233	0,01
15 W	0,107	0,01
16 Zn	0,096	0,009
17 Cu	0,069	0,008
18 Zr	0,029	0,005
19 Sr	0,028	0,005
20 Rb	0,019	0,004

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	4,0

## Quantification of sample V15 Ash

R.M.S.:	0,070
Result status:	
Sum before normalization:	65,7 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	2,350
Weight after pressing (g):	4,700
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	45,250	0,1
2 Si	14,214	0,1
3 P	11,304	0,09
4 Fe	8,222	0,08
5 Al	5,771	0,07
6 Mg	5,004	0,07
7 Cl	4,405	0,06
8 K	2,160	0,04
9 S	1,028	0,03
10 Ti	0,880	0,03
11 Na	0,561	0,02
12 Zn	0,487	0,02
13 Cu	0,208	0,01
14 Mn	0,155	0,01
15 Cr	0,127	0,01
16 Sr	0,078	0,008
17 Ni	0,062	0,007
18 Zr	0,044	0,006
19 Pb	0,012	0,003
20 Rb	0,011	0,003
21 Co	0,009	0,003
22 Br	0,004	0,002
23 Mo	0,004	0,002

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	2,35

## Quantification of sample V15 Bed

R.M.S.:	0,049
Result status:	
Sum before normalization:	58,1 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3,200
Weight after pressing (g):	6,400
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	91,808	0,1
2 Cl	2,878	0,05
3 Mg	1,679	0,04
4 Fe	0,793	0,03
5 S	0,760	0,03
6 Si	0,638	0,02
7 K	0,335	0,02
8 P	0,329	0,02
9 Al	0,265	0,02
10 Cr	0,121	0,01
11 Zn	0,085	0,009
12 Sr	0,071	0,008
13 Ti	0,064	0,008
14 Na	0,053	0,007
15 Cu	0,036	0,006
16 Ni	0,031	0,005
17 Mn	0,027	0,005
18 Br	0,013	0,003
19 Pb	0,013	0,003

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	3,2

## Quantification of sample V16 Ash

R.M.S.:	0,082
Result status:	
Sum before normalization:	65,9 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	2,500
Weight after pressing (g):	5,000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	48,468	0,1
2 Si	13,095	0,1
3 P	9,581	0,09
4 Fe	8,989	0,09
5 Cl	5,059	0,07
6 Al	5,050	0,07
7 Mg	4,371	0,06
8 K	1,286	0,03
9 Cr	1,181	0,03
10 S	0,822	0,03
11 Ti	0,773	0,03
12 Na	0,410	0,02
13 Mn	0,216	0,01
14 Zn	0,192	0,01
15 Cu	0,185	0,01
16 Ni	0,172	0,01
17 Sr	0,083	0,009
18 Zr	0,040	0,006
19 Mo	0,008	0,003
20 Co	0,007	0,002
21 Br	0,006	0,002
22 Rb	0,005	0,002

## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	2,5

## Quantification of sample V16 Bed

R.M.S.:	0,093
Result status:	
Sum before normalization:	61,8 %
Normalised to:	100,0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	4,900
Weight after pressing (g):	9,800
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Results database:	omnian37
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1 Ca	89,406	0,1
2 Cl	3,287	0,05
3 Fe	2,057	0,04
4 Mg	1,452	0,04
5 S	1,262	0,03
6 Cr	0,651	0,02
7 Si	0,543	0,02
8 K	0,370	0,02
9 P	0,269	0,02
10 Al	0,230	0,01
11 Mn	0,098	0,009
12 Ni	0,078	0,008
13 Zn	0,078	0,008
14 Sr	0,052	0,007
15 Na	0,051	0,007
16 Ti	0,050	0,007
17 Cu	0,050	0,007
18 Br	0,009	0,003
19 Pb	0,008	0,003

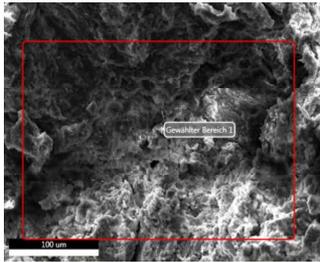
## Binder

Chemical formula	Weight (g)
C18H36O2N2	4,9

475X 20180807

Autor: whitmore  
Erstellt: 08/07/2018 8:58:41 AM  
Probenbezeichnung: KS-Pellets

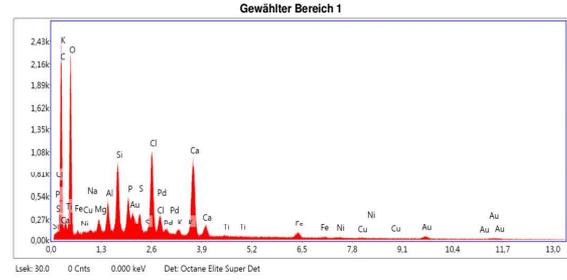
Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1

kV: 20 Vergr.: 1000 Abnahmewinkel: 41 Live Messdauer(s): 30 Filterzeit(µs): 7.68 Auflösung(êV)



eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	38.9	52.7	663.7	9.7	0.0852	1.0605	0.9659	0.2366	1.0000
O K	34.2	34.8	859.3	10.0	0.0507	1.0151	0.9866	0.1671	1.0000
Na K	0.3	0.2	18.7	25.2	0.0010	0.9222	1.0114	0.3952	1.0036
Mg K	0.9	0.6	90.2	10.0	0.0041	0.9380	1.0186	0.5626	1.0062
Al K	1.6	1.0	193.1	6.9	0.0089	0.9033	1.0253	0.7031	1.0100
Si K	3.5	2.0	471.5	4.4	0.0229	0.9232	1.0316	0.8027	1.0128
P K	2.1	1.1	248.1	6.7	0.0141	0.8867	1.0375	0.8536	1.0181
S K	1.2	0.6	153.5	8.3	0.0090	0.9042	1.0431	0.9002	1.0259
Cl K	5.6	2.6	633.5	3.1	0.0406	0.8601	1.0483	0.9369	1.0238
K K	0.5	0.2	46.1	16.1	0.0036	0.8560	1.0579	0.9642	1.0509
Ca K	8.6	3.5	685.3	2.5	0.0654	0.8716	1.0622	0.9816	1.0221
Ti K	0.2	0.1	14.8	55.6	0.0016	0.7901	1.0698	0.9788	1.0424
Fe K	1.6	0.5	60.7	15.1	0.0115	0.7771	1.0800	1.0041	1.0934
Ni K	0.4	0.1	13.6	56.7	0.0034	0.7841	1.0814	1.0058	1.1280
Cu K	0.4	0.1	8.9	57.3	0.0027	0.7438	1.0808	1.0068	1.1593

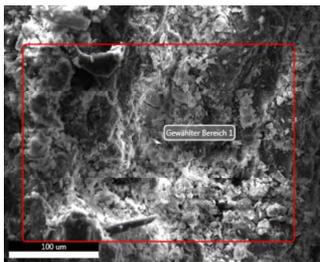
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

EDAX TEAM

475X 20180807

Autor: whitmore  
Erstellt: 08/07/2018 8:56:34 AM  
Probenbezeichnung: KS-Granulat

Bereich 1

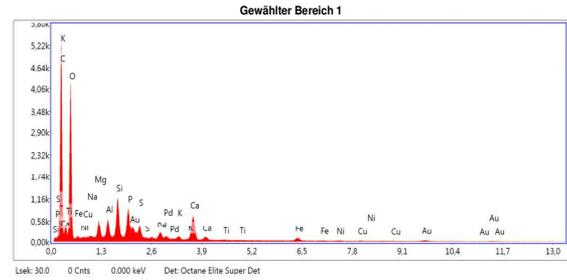


Notizen:

EDAX TEAM

Gewählter Bereich 1

kV: 20 Vergr.: 1000 Abnahmewinkel: 41.2 Live Messdauer(s): 30 Filterzeit(µs): 7.68 Auflösung(êV)



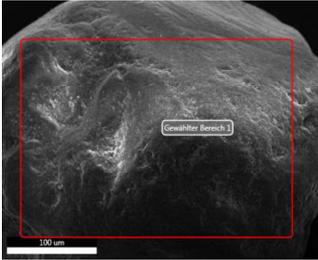
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	45.6	56.5	1628.7	10.0	0.1536	1.0406	0.9781	0.3529	1.0000
O K	39.5	36.8	1594.6	9.5	0.0693	0.9952	0.9979	0.1918	1.0000
Na K	0.1	0.1	7.6	64.0	0.0003	0.9034	1.0216	0.4043	1.0032
Mg K	1.3	0.8	195.9	7.6	0.0065	0.9186	1.0284	0.5770	1.0052
Al K	1.3	0.7	222.2	6.1	0.0075	0.8845	1.0347	0.7131	1.0082
Si K	2.9	1.5	544.0	4.4	0.0195	0.9037	1.0406	0.8147	1.0099
P K	2.6	1.3	435.9	3.9	0.0183	0.8679	1.0462	0.8695	1.0116
S K	1.0	0.5	175.2	6.1	0.0076	0.8848	1.0515	0.9090	1.0153
K K	0.2	0.1	32.2	19.6	0.0019	0.8374	1.0653	0.9944	1.0495
Ca K	3.9	1.4	447.1	2.9	0.0315	0.8526	1.0693	1.0053	1.0311
Ti K	0.1	0.0	6.0	57.4	0.0005	0.7726	1.0763	1.0054	1.0609
Fe K	1.2	0.3	65.7	14.2	0.0092	0.7597	1.0853	1.0141	1.1293
Ni K	0.2	0.1	9.3	58.2	0.0017	0.7663	1.0860	1.0125	1.1840
Cu K	0.2	0.0	6.8	58.2	0.0015	0.7268	1.0851	1.0121	1.2303

475X 20180807

Autor: whitmore  
 Erstellt: 08/07/2018 9:00:34 AM  
 Probenbezeichnung: Quarzsand

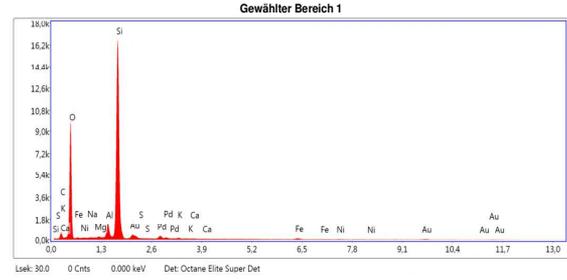
Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1

kV: 20 Vergr.: 1000 Abnahmwinkel: 41.1 Live Messdauer(s): 30 Filterzeit(µs): 7.68 Auflösung(êV)



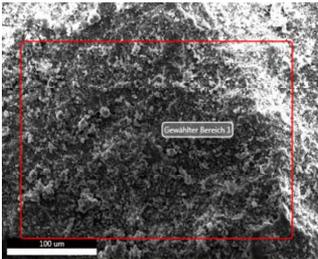
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	8.3	13.3	128.6	13.5	0.0108	1.0845	0.9565	0.1307	1.0000
O K	46.7	56.3	3781.8	7.9	0.1465	1.0387	0.9778	0.3279	1.0000
NaK	0.1	0.1	10.9	62.6	0.0004	0.9440	1.0035	0.4284	1.0080
MgK	0.2	0.1	28.5	24.4	0.0008	0.9602	1.0109	0.5980	1.0153
AlK	2.8	2.0	604.6	5.1	0.0182	0.9248	1.0178	0.7410	1.0259
SiK	39.8	27.3	8937.7	3.0	0.2846	0.9451	1.0244	0.8194	1.0027
S K	0.1	0.1	16.9	59.1	0.0007	0.9257	1.0364	0.7009	1.0062
K K	0.3	0.1	41.5	21.8	0.0022	0.8764	1.0519	0.9034	1.0181
CaK	0.1	0.1	16.5	55.5	0.0010	0.8924	1.0564	0.9354	1.0240
FeK	1.1	0.4	73.1	13.6	0.0091	0.7956	1.0756	1.0038	1.1100
NiK	0.5	0.2	24.6	35.2	0.0041	0.8027	1.0776	1.0063	1.1534

475X 20180807

Autor: whitmore  
 Erstellt: 08/07/2018 8:50:17 AM  
 Probenbezeichnung: CaCo3

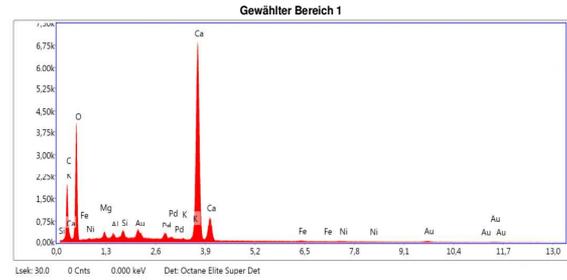
Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1

kV: 20 Vergr.: 1000 Abnahmwinkel: 41.1 Live Messdauer(s): 30 Filterzeit(µs): 7.68 Auflösung(êV)



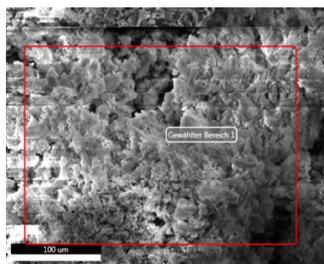
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	10.2	17.3	502.3	8.6	0.0449	1.0859	0.9409	0.4352	1.0000
O K	48.0	61.1	1635.9	9.9	0.0672	1.0507	0.9632	0.1446	1.0000
MgK	0.8	0.6	105.5	10.8	0.0033	0.9727	0.9979	0.4742	1.0065
AlK	0.4	0.3	73.4	11.9	0.0023	0.9371	1.0053	0.6197	1.0115
SiK	0.7	0.5	141.3	8.9	0.0048	0.9580	1.0122	0.7427	1.0191
K K	0.1	0.0	11.6	58.5	0.0006	0.8893	1.0416	0.9941	1.2006
CaK	38.7	19.7	4937.3	1.5	0.3286	0.9057	1.0465	1.0056	1.0119
FeK	0.5	0.2	30.8	29.6	0.0041	0.8084	1.0680	0.9780	1.0617
NiK	0.6	0.2	26.2	33.0	0.0046	0.8161	1.0708	0.9903	1.0880

475X 20180807

Autor: whitmore  
 Erstellt: 08/07/2018 9:02:10 AM  
 Probenbezeichnung: V1 Ash

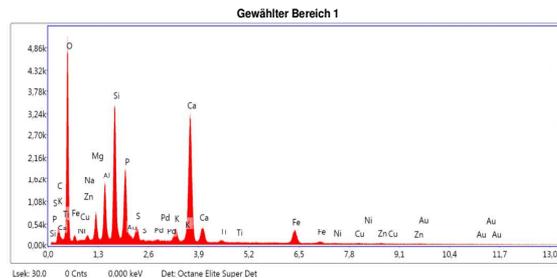
Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1

kV: 20 Vergr.: 1000 Abnahmwinkel: 41.1 Live Messdauer(s): 30 Filterzeit(µs): 7.68 Auflösung(êV)



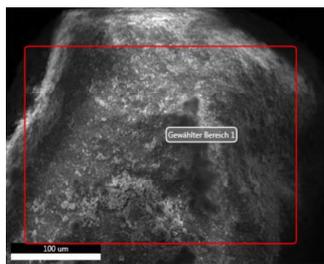
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	2.8	5.1	54.3	100.0	0.0055	1.1159	0.9362	0.1829	1.0000
O K	43.7	60.6	1995.4	9.3	0.0938	1.0701	0.9587	0.2041	1.0000
Na K	0.4	0.4	28.1	21.3	0.0012	0.9739	0.9859	0.3428	1.0042
Mg K	2.3	2.1	308.5	7.7	0.0111	0.9910	0.9938	0.4960	1.0072
Al K	4.3	3.5	692.7	5.9	0.0253	0.9547	1.0013	0.6251	1.0110
Si K	10.1	8.0	1807.7	4.4	0.0699	0.9760	1.0084	0.7138	1.0116
P K	6.9	4.9	1041.7	4.5	0.0471	0.9378	1.0150	0.7340	1.0135
S K	1.4	1.0	230.0	6.9	0.0108	0.9565	1.0213	0.7763	1.0198
K K	1.6	0.9	220.3	7.0	0.0139	0.9062	1.0383	0.9309	1.0672
Ca K	19.7	10.9	2280.9	2.2	0.1736	0.9229	1.0433	0.9514	1.0193
Ti K	0.5	0.2	44.6	23.2	0.0038	0.8369	1.0524	0.9318	1.0374
Fe K	5.2	2.1	292.2	4.7	0.0443	0.8239	1.0656	0.9856	1.0636
Ni K	0.3	0.1	11.7	56.9	0.0024	0.8317	1.0686	0.9901	1.0929
Cu K	0.4	0.1	15.0	56.3	0.0036	0.7892	1.0690	0.9942	1.1141
Zn K	0.4	0.2	13.4	56.8	0.0039	0.7867	1.0682	0.9971	1.1356

475X 20180807

Autor: whitmore  
 Erstellt: 08/07/2018 9:03:39 AM  
 Probenbezeichnung: V1 Bed

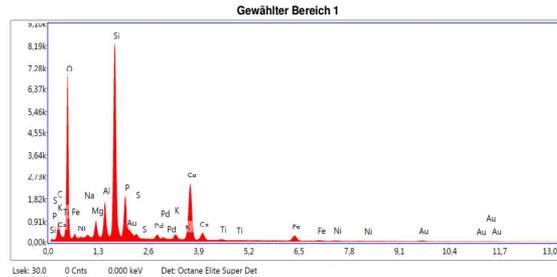
Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1

kV: 20 Vergr.: 1000 Abnahmwinkel: 40.9 Live Messdauer(s): 30 Filterzeit(µs): 7.68 Auflösung(êV)



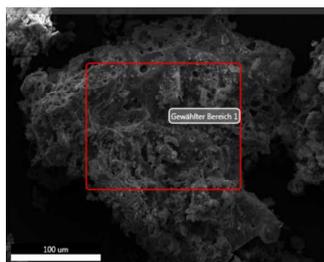
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	9.7	16.2	214.1	11.6	0.0165	1.0960	0.9484	0.1646	1.0000
O K	42.9	53.7	2703.9	9.0	0.0955	1.0502	0.9702	0.2258	1.0000
Na K	0.7	0.6	77.0	13.1	0.0025	0.9550	0.9965	0.3855	1.0052
Mg K	2.0	1.6	371.6	7.1	0.0100	0.9716	1.0042	0.5458	1.0091
Al K	3.5	2.6	767.9	5.3	0.0211	0.9359	1.0114	0.6740	1.0144
Si K	18.8	13.5	4472.9	3.7	0.1298	0.9566	1.0181	0.7600	1.0086
P K	5.8	3.8	1051.7	4.8	0.0357	0.9190	1.0245	0.7018	1.0096
S K	0.6	0.4	121.2	10.2	0.0043	0.9372	1.0305	0.7553	1.0143
K K	0.9	0.5	150.2	9.8	0.0071	0.8875	1.0466	0.9255	1.0481
Ca K	11.8	5.9	1695.1	2.3	0.0968	0.9038	1.0513	0.9502	1.0196
Ti K	0.3	0.1	31.3	27.7	0.0020	0.8194	1.0598	0.9521	1.0379
Fe K	2.7	1.0	190.6	7.0	0.0217	0.8062	1.0718	0.9942	1.0754
Ni K	0.3	0.1	16.7	55.7	0.0025	0.8137	1.0741	0.9985	1.1104

475X 20180807

Autor: whitmore  
 Erstellt: 08/07/2018 9:05:46 AM  
 Probenbezeichnung: V2 Ash

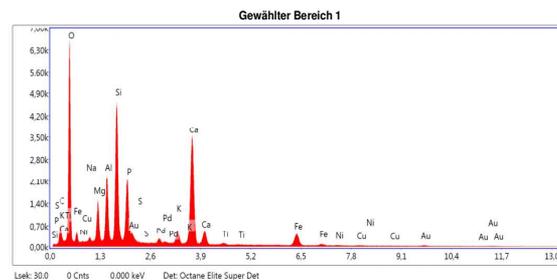
**Bereich 1**



Nolizen:

Gewählter Bereich 1

kV: 20 Vergr.: 1000 Abnahmwinkel: 41.2 Live Messdauer(s): 30 Filterzeit(µs): 7.68 Auflösung(µV)



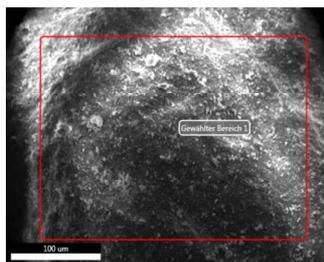
**eZAF Quant. Ergebnisse**

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	5.1	9.1	125.1	12.9	0.0099	1.1103	0.9402	0.1841	1.0000
O K	42.8	57.4	2544.6	9.2	0.0926	1.0645	0.9625	0.2129	1.0000
NaK	0.8	0.7	76.5	12.6	0.0026	0.9685	0.9894	0.3566	1.0045
MgK	3.6	3.2	634.5	7.0	0.0177	0.9855	0.9973	0.5118	1.0074
AlK	5.4	4.3	1097.0	5.5	0.0311	0.9493	1.0046	0.6275	1.0106
SiK	10.9	8.3	2412.4	4.4	0.0723	0.9705	1.0116	0.7065	1.0104
P K	6.5	4.5	1203.9	4.5	0.0422	0.9324	1.0182	0.7225	1.0119
S K	0.1	0.1	17.5	58.2	0.0006	0.9509	1.0244	0.7695	1.0187
K K	1.5	0.8	268.4	6.2	0.0132	0.9008	1.0411	0.9331	1.0628
CaK	17.3	9.2	2488.5	2.1	0.1468	0.9174	1.0460	0.9532	1.0199
TiK	0.4	0.2	48.4	23.9	0.0032	0.8318	1.0549	0.9394	1.0385
FeK	4.9	1.9	339.8	4.5	0.0399	0.8188	1.0676	0.9887	1.0651
NiK	0.3	0.1	18.4	50.5	0.0029	0.8265	1.0705	0.9926	1.0937
CuK	0.3	0.1	15.0	56.2	0.0028	0.7842	1.0707	0.9961	1.1188

475X 20180807

Autor: whitmore  
 Erstellt: 08/07/2018 9:07:57 AM  
 Probenbezeichnung: V2 Bed

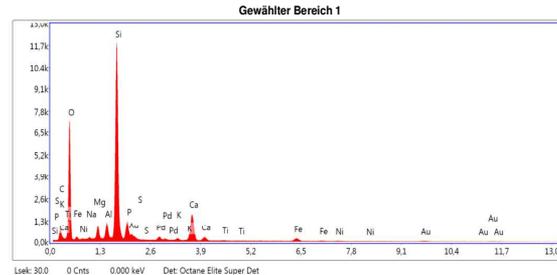
**Bereich 1**



Nolizen:

Gewählter Bereich 1

kV: 20 Vergr.: 1000 Abnahmwinkel: 40.8 Live Messdauer(s): 30 Filterzeit(µs): 7.68 Auflösung(µV)



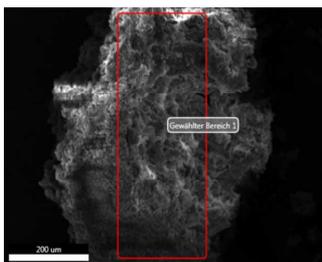
**eZAF Quant. Ergebnisse**

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	8.0	13.4	150.1	12.0	0.0120	1.0960	0.9489	0.1476	1.0000
O K	42.8	54.1	2836.1	8.8	0.1045	1.0501	0.9706	0.2489	1.0000
NaK	0.7	0.6	71.7	13.0	0.0024	0.9549	0.9969	0.3998	1.0061
MgK	2.2	1.8	400.9	7.0	0.0113	0.9715	1.0046	0.5613	1.0106
AlK	2.5	1.9	533.7	5.6	0.0153	0.9357	1.0117	0.6857	1.0179
SiK	27.2	19.6	6300.2	3.5	0.1905	0.9565	1.0185	0.7781	1.0064
P K	4.2	2.7	674.1	5.5	0.0239	0.9188	1.0248	0.6573	1.0077
S K	0.2	0.1	35.9	21.9	0.0013	0.9370	1.0308	0.7270	1.0117
K K	0.5	0.3	79.0	14.6	0.0039	0.8873	1.0469	0.9141	1.0392
CaK	8.7	4.4	1193.3	2.5	0.0710	0.9036	1.0516	0.9428	1.0206
TiK	0.3	0.1	29.7	33.3	0.0020	0.8191	1.0601	0.9561	1.0398
FeK	2.4	0.9	162.9	7.4	0.0193	0.8060	1.0720	0.9559	1.0814
NiK	0.4	0.2	23.4	35.1	0.0037	0.8134	1.0743	0.9999	1.1165

Klaerschlamm 20180802

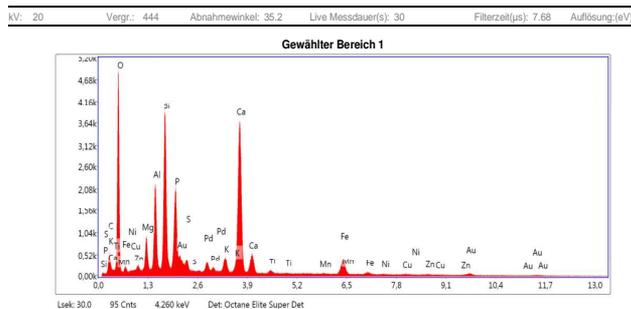
Autor: whitmore  
Erstellt: 08/02/2018 10:48:23 AM  
Probenbezeichnung: V3 Ash

Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1



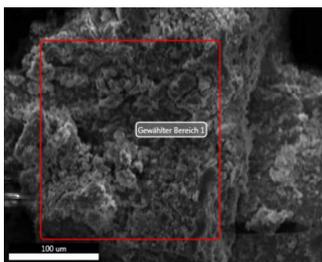
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	4.8	8.7	94.7	100.0	0.0088	1.1144	0.9371	0.1785	1.0000
O K	41.7	57.1	1847.9	9.5	0.0758	1.0686	0.9595	0.1829	1.0000
MgK	2.3	2.1	333.7	7.9	0.0100	0.9896	0.9946	0.4733	1.0076
AlK	5.6	4.5	993.5	5.9	0.0302	0.9534	1.0021	0.6041	1.0109
SiK	10.2	7.9	1994.1	4.7	0.0638	0.9746	1.0091	0.6838	1.0114
PK	6.9	4.9	1147.7	4.8	0.0428	0.9364	1.0157	0.7045	1.0132
SK	0.9	0.6	160.2	8.2	0.0062	0.9551	1.0220	0.7500	1.0198
KK	1.5	0.9	249.2	7.4	0.0128	0.9048	1.0389	0.9233	1.0674
CaK	19.6	10.7	2607.7	2.2	0.1620	0.9215	1.0439	0.9461	1.0193
TiK	0.5	0.2	55.4	19.9	0.0038	0.8356	1.0529	0.9240	1.0372
MnK	0.3	0.1	19.1	56.0	0.0020	0.8099	1.0635	0.9747	1.0635
FeK	4.9	1.9	315.8	5.0	0.0389	0.8226	1.0660	0.9839	1.0630
NiK	0.2	0.1	12.4	56.9	0.0020	0.8305	1.0891	0.9891	1.0924
CuK	0.4	0.1	15.1	56.3	0.0029	0.7880	1.0694	0.9937	1.1149
ZnK	0.3	0.1	10.2	57.8	0.0024	0.7855	1.0686	0.9969	1.1379

Klaerschlamm 20180802

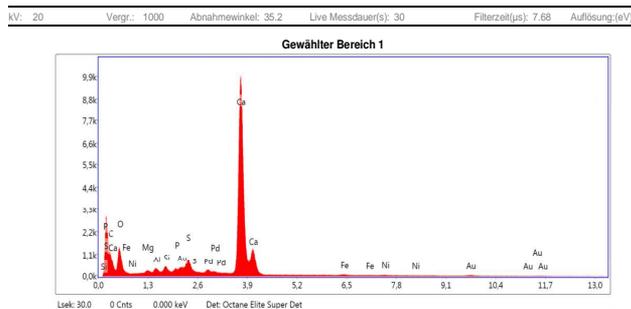
Autor: whitmore  
Erstellt: 08/02/2018 11:29:07 AM  
Probenbezeichnung: V3 Bed

Bereich 2



Notizen: Fit war nicht so gut

Gewählter Bereich 1



eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	11.4	22.7	562.6	8.1	0.0454	1.1253	0.9207	0.3737	1.0000
O K	26.3	39.4	712.3	10.8	0.0253	1.0801	0.9439	0.0939	1.0000
MgK	0.4	0.4	70.6	13.1	0.0018	1.0014	0.9804	0.4490	1.0077
AlK	0.6	0.5	121.6	10.8	0.0032	0.9650	0.9883	0.5969	1.0138
SiK	0.7	0.6	180.8	7.8	0.0050	0.9867	0.9957	0.7219	1.0232
PK	0.4	0.3	100.8	11.1	0.0033	0.9483	1.0027	0.8160	1.0390
SK	2.0	1.5	507.7	3.8	0.0169	0.9674	1.0093	0.8857	1.0596
CaK	57.0	34.0	9448.9	1.4	0.5081	0.9341	1.0327	0.9975	1.0099
FeK	0.6	0.3	45.6	25.1	0.0049	0.8347	1.0572	0.9522	1.0513
NiK	0.6	0.2	33.1	31.3	0.0047	0.8431	1.0612	0.9741	1.0744

Klaerschlam 20180802

Autor: whitmore  
 Erstellt: 08/02/2018 11:45:14 AM  
 Probenbezeichnung: V3 Bed

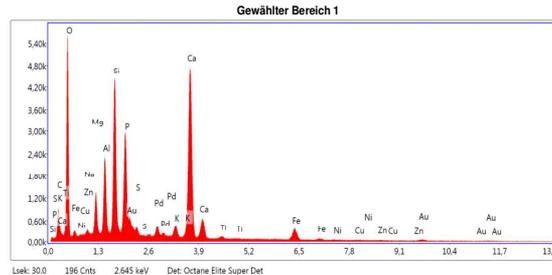
Bereich 4



Notizen:

Gewählter Bereich 1

kV: 20 Vergr.: 2000 Abnahwinkel: 35.4 Live Messdauer(s): 30 Filterzeit(µs): 7.68 Auflösung(êV)



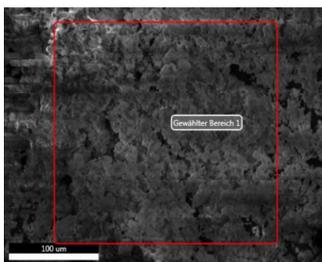
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	6.8	12.0	167.4	13.3	0.0129	1.1086	0.9402	0.1823	1.0000
O K	41.4	55.2	2151.7	9.6	0.0730	1.0628	0.9625	0.1759	1.0000
NaK	0.3	0.3	30.6	25.3	0.0009	0.9670	0.9894	0.3312	1.0046
MgK	2.8	2.5	519.6	7.4	0.0129	0.9840	0.9973	0.4878	1.0077
AlK	4.8	3.8	1051.0	5.8	0.0265	0.9479	1.0047	0.6129	1.0114
SiK	9.3	7.1	2274.1	4.6	0.0603	0.9690	1.0116	0.6981	1.0123
P K	7.9	5.5	1649.3	4.4	0.0510	0.9310	1.0182	0.7219	1.0134
S K	0.6	0.4	136.5	10.3	0.0044	0.9495	1.0244	0.7570	1.0206
K K	1.0	0.6	207.1	9.7	0.0088	0.8995	1.0411	0.9276	1.0721
CaK	20.8	11.0	3368.5	2.0	0.1736	0.9160	1.0460	0.9516	1.0173
TiK	0.4	0.2	49.7	24.2	0.0028	0.8306	1.0549	0.9241	1.0333
FeK	3.5	1.3	272.7	5.9	0.0279	0.8175	1.0677	0.9841	1.0642
NiK	0.2	0.1	10.4	57.5	0.0014	0.8253	1.0705	0.9913	1.0957
CuK	0.1	0.0	6.1	59.1	0.0010	0.7830	1.0707	0.9955	1.1222
ZnK	0.1	0.0	3.7	61.7	0.0007	0.7805	1.0698	0.9985	1.1486

Klaerschlam 20180802

Autor: whitmore  
 Erstellt: 08/02/2018 11:37:35 AM  
 Probenbezeichnung: V4 Ash

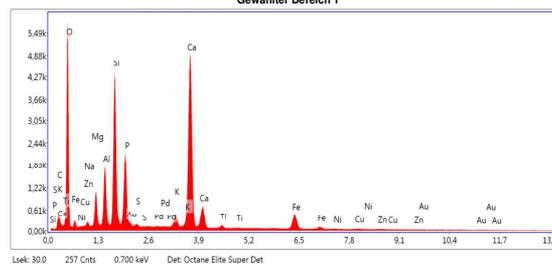
Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1

kV: 20 Vergr.: 1000 Abnahwinkel: 35.4 Live Messdauer(s): 30 Filterzeit(µs): 7.68 Auflösung(êV)



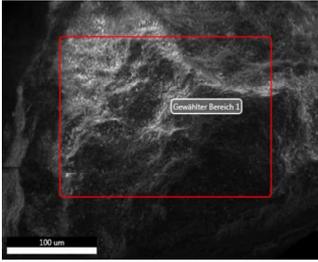
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	2.6	4.9	64.8	20.8	0.0056	1.1159	0.9356	0.1915	1.0000
O K	43.6	60.7	2198.5	9.5	0.0834	1.0702	0.9581	0.1805	1.0000
NaK	0.4	0.4	34.3	19.7	0.0012	0.9740	0.9854	0.3121	1.0042
MgK	2.7	2.5	450.9	7.7	0.0125	0.9911	0.9934	0.4618	1.0071
AlK	4.1	3.4	820.8	6.1	0.0231	0.9548	1.0009	0.5888	1.0109
SiK	9.8	7.8	2215.6	4.7	0.0657	0.9762	1.0079	0.6838	1.0116
P K	6.2	4.4	1191.6	4.7	0.0412	0.9379	1.0146	0.7081	1.0142
S K	0.2	0.1	41.6	19.6	0.0015	0.9566	1.0209	0.7578	1.0223
K K	1.3	0.7	237.0	6.8	0.0113	0.9063	1.0379	0.9301	1.0779
CaK	22.7	12.6	3497.3	2.0	0.2015	0.9231	1.0430	0.9526	1.0182
TiK	0.4	0.2	54.8	20.4	0.0035	0.8370	1.0520	0.9189	1.0353
FeK	4.8	1.9	360.7	4.7	0.0412	0.8240	1.0653	0.9818	1.0622
NiK	0.2	0.1	13.7	56.6	0.0021	0.8319	1.0684	0.9881	1.0913
CuK	0.4	0.1	17.5	56.0	0.0032	0.7894	1.0687	0.9928	1.1132
ZnK	0.4	0.1	14.3	56.7	0.0031	0.7869	1.0680	0.9963	1.1354

Klaerschlam 20180802

Autor: whitmore  
 Erstellt: 08/02/2018 12:03:29 PM  
 Probenbezeichnung: V4 Bed beige

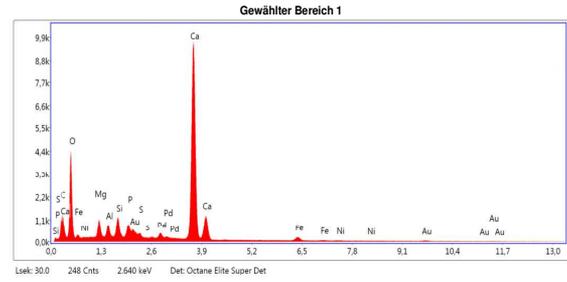
**Bereich 1**



Nolizen:

Gewählter Bereich 1

kV: 20 Vergr.: 1000 Abnahmewinkel: 35.1 Live Messdauer(s): 30 Filterzeit(µs): 7.68 Auflösung(µV)



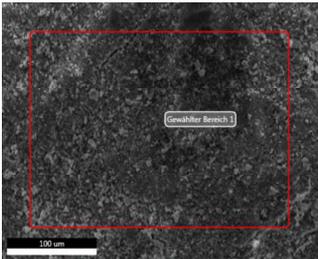
**eZAF Quant. Ergebnisse**

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	2.2	4.0	97.7	12.3	0.0072	1.1144	0.9316	0.3149	1.0000
O K	45.9	64.8	1938.0	10.0	0.0622	1.0689	0.9543	0.1339	1.0000
MgK	2.6	2.4	462.7	8.1	0.0109	0.9903	0.9899	0.4372	1.0066
AlK	1.5	1.2	322.1	8.0	0.0077	0.9541	0.9975	0.5673	1.0113
SiK	2.1	1.7	554.3	5.9	0.0139	0.9755	1.0047	0.6883	1.0177
P K	1.6	1.1	382.6	7.7	0.0112	0.9373	1.0114	0.7764	1.0282
S K	0.5	0.3	122.1	9.5	0.0037	0.9560	1.0179	0.8460	1.0448
CaK	41.5	23.4	7486.0	1.5	0.3633	0.9227	1.0403	0.9903	1.0122
FeK	1.9	0.8	160.9	10.4	0.0155	0.8239	1.0632	0.9683	1.0558
NiK	0.3	0.1	17.9	55.8	0.0023	0.8318	1.0665	0.9830	1.0829

Klaerschlam 20180802

Autor: whitmore  
 Erstellt: 08/02/2018 11:54:26 AM  
 Probenbezeichnung: V4 Bed weiss

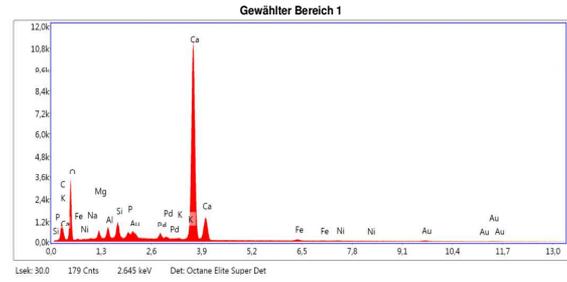
**Bereich 1**



Nolizen:

Gewählter Bereich 1

kV: 20 Vergr.: 1000 Abnahmewinkel: 35 Live Messdauer(s): 30 Filterzeit(µs): 7.68 Auflösung(µV)



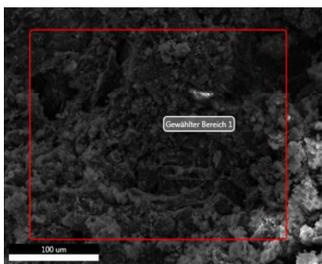
**eZAF Quant. Ergebnisse**

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	3.3	6.4	149.7	11.6	0.0121	1.1211	0.9261	0.3528	1.0000
O K	40.0	58.8	1298.7	10.3	0.0460	1.0756	0.9490	0.1144	1.0000
NaK	0.2	0.2	15.3	51.3	0.0005	0.9795	0.9770	0.2874	1.0040
MgK	1.2	1.2	189.3	9.7	0.0049	0.9969	0.9851	0.4360	1.0073
AlK	1.4	1.2	285.6	7.7	0.0075	0.9605	0.9929	0.5778	1.0126
SiK	2.2	1.8	514.2	6.1	0.0142	0.9821	1.0001	0.6980	1.0200
P K	0.8	0.6	187.3	9.3	0.0060	0.9438	1.0070	0.7838	1.0329
K K	0.1	0.1	21.0	56.9	0.0009	0.9123	1.0312	0.9786	1.2067
CaK	49.6	29.1	8102.2	1.4	0.4338	0.9293	1.0364	0.9950	1.0107
FeK	0.9	0.4	65.7	18.6	0.0070	0.8301	1.0602	0.9600	1.0539
NiK	0.4	0.2	22.9	45.7	0.0032	0.8382	1.0638	0.9789	1.0792

Klaerschlamm 20180802

Autor: whitmore  
 Erstellt: 08/02/2018 12:08:49 PM  
 Probenbezeichnung: V5 Ash

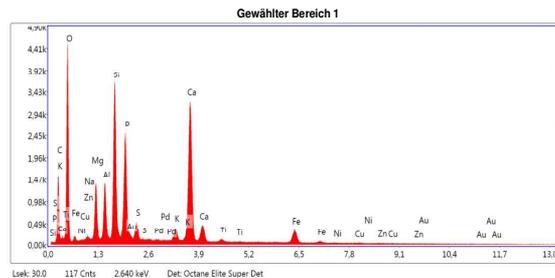
Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1

kV: 20 Vergr.: 1000 Abnahmewinkel: 35 Live Messdauer(s): 30 Filterzeit(µs): 7.68 Auflösung(êV)



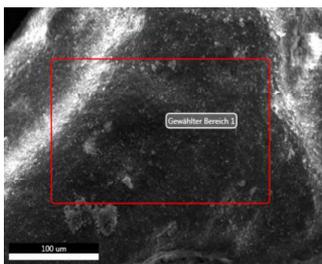
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	16.3	26.8	373.6	74.9	0.0334	1.0956	0.9468	0.1905	1.0000
O K	37.7	46.3	1716.4	9.6	0.0672	1.0500	0.9688	0.1737	1.0000
NaK	0.3	0.2	25.1	23.3	0.0009	0.9550	0.9952	0.3398	1.0044
MgK	3.7	3.0	610.3	7.1	0.0174	0.9716	1.0029	0.4970	1.0070
AlK	3.2	2.4	633.2	6.1	0.0183	0.9359	1.0101	0.6135	1.0110
SiK	8.4	5.9	1860.2	4.5	0.0567	0.9567	1.0169	0.7122	1.0119
PK	7.4	4.7	1400.7	4.3	0.0498	0.9191	1.0233	0.7395	1.0127
SK	1.3	0.8	258.4	7.8	0.0095	0.9373	1.0294	0.7737	1.0184
KK	1.2	0.6	202.7	7.7	0.0099	0.8878	1.0456	0.9336	1.0623
CaK	15.6	7.7	2283.3	2.1	0.1350	0.9042	1.0503	0.9559	1.0198
TiK	0.3	0.1	41.0	21.1	0.0027	0.8197	1.0589	0.9409	1.0383
FeK	3.7	1.3	266.0	5.4	0.0312	0.8067	1.0710	0.9911	1.0705
NiK	0.2	0.1	12.2	56.9	0.0019	0.8142	1.0735	0.9955	1.1029
CuK	0.4	0.1	18.3	52.8	0.0034	0.7725	1.0735	0.9988	1.1269
ZnK	0.3	0.1	11.3	57.0	0.0025	0.7699	1.0724	1.0011	1.1517

Klaerschlamm 20180802

Autor: whitmore  
 Erstellt: 08/02/2018 12:14:29 PM  
 Probenbezeichnung: V5 Bed

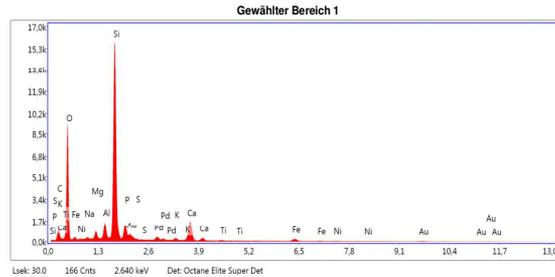
Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1

kV: 20 Vergr.: 1000 Abnahmewinkel: 35 Live Messdauer(s): 30 Filterzeit(µs): 7.68 Auflösung(êV)



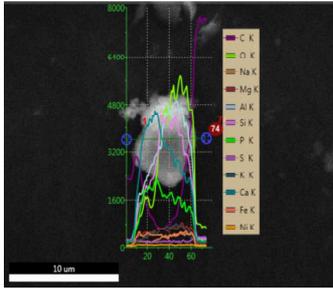
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	10.1	16.3	215.8	11.8	0.0149	1.0885	0.9533	0.1444	1.0000
O K	44.6	54.4	3502.8	8.8	0.1062	1.0428	0.9748	0.2422	1.0000
NaK	0.4	0.4	51.8	16.8	0.0014	0.9479	1.0007	0.3742	1.0063
MgK	1.2	1.0	272.8	7.8	0.0060	0.9643	1.0082	0.5386	1.0115
AlK	2.4	1.8	660.4	5.7	0.0148	0.9288	1.0153	0.6777	1.0194
SiK	28.4	19.7	8366.4	3.5	0.1973	0.9493	1.0219	0.7732	1.0057
PK	3.8	2.4	753.2	5.8	0.0207	0.9119	1.0281	0.6272	1.0068
SK	0.2	0.1	39.3	21.6	0.0011	0.9298	1.0341	0.7024	1.0103
KK	0.5	0.2	94.6	13.4	0.0036	0.8804	1.0498	0.9057	1.0336
CaK	6.3	3.1	1114.2	2.7	0.0510	0.8966	1.0544	0.9375	1.0210
TiK	0.2	0.1	26.2	38.7	0.0013	0.8127	1.0627	0.9589	1.0407
FeK	1.7	0.6	152.8	9.2	0.0139	0.7995	1.0741	0.9989	1.0883
NiK	0.2	0.1	16.5	55.7	0.0020	0.8068	1.0762	1.0030	1.1300

Klaerschlamm 20180802

Autor: whitmore  
 Erstellt: 08/02/2018 1:07:07 PM  
 Probenbezeichnung: V6 Ash

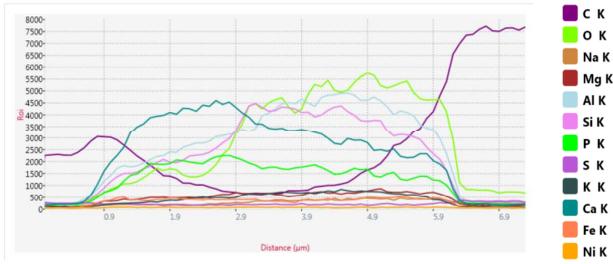
Bereich 2



Notizen:

Linienprofil 1

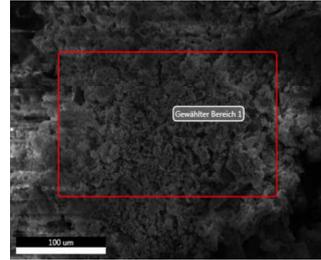
Element profile plot



Klaerschlamm 20180802

Autor: whitmore  
 Erstellt: 08/02/2018 12:18:22 PM  
 Probenbezeichnung: V6 Ash

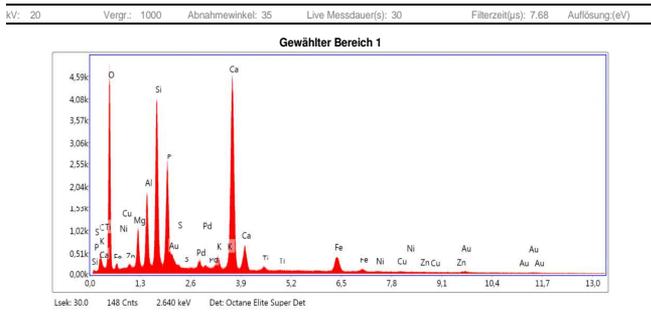
Bereich 1



Notizen:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Gewählter Bereich 1



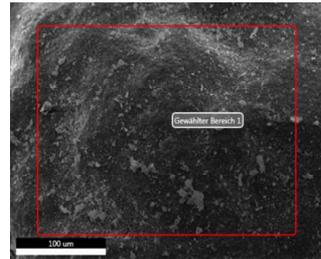
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	4.2	7.8	91.4	16.2	0.0061	1.1169	0.9352	0.1815	1.0000
O K	40.6	56.5	1822.1	9.6	0.0708	1.0711	0.9577	0.1725	1.0000
MgK	2.7	2.5	425.7	7.7	0.0121	0.9920	0.9930	0.4712	1.0075
AlK	4.6	3.8	870.8	6.1	0.0250	0.9557	1.0005	0.5980	1.0113
SiK	10.0	7.9	2120.4	4.7	0.0641	0.9771	1.0076	0.6871	1.0122
P K	7.9	5.7	1422.5	4.6	0.0501	0.9388	1.0143	0.7083	1.0136
S K	0.2	0.1	36.7	20.1	0.0013	0.9575	1.0206	0.7467	1.0214
K K	1.2	0.7	213.8	9.2	0.0104	0.9072	1.0376	0.9243	1.0750
CaK	22.5	12.5	3230.0	2.1	0.1895	0.9240	1.0427	0.9483	1.0181
TiK	0.5	0.2	53.7	18.7	0.0035	0.8378	1.0518	0.9166	1.0350
FeK	4.9	1.9	339.1	4.8	0.0394	0.8249	1.0651	0.9810	1.0614
NiK	0.3	0.1	13.7	56.6	0.0021	0.8328	1.0682	0.9876	1.0897
CuK	0.4	0.1	16.1	56.2	0.0030	0.7902	1.0685	0.9925	1.1125
ZnK	0.2	0.1	6.5	58.5	0.0014	0.7877	1.0678	0.9960	1.1362

Klaerschlamm 20180802

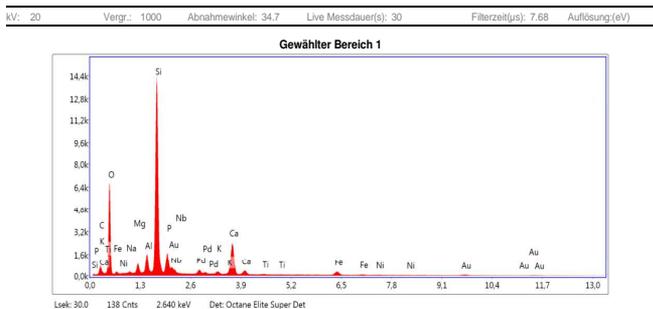
Autor: whitmore  
 Erstellt: 08/02/2018 12:23:39 PM  
 Probenbezeichnung: V6 Bed

Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1



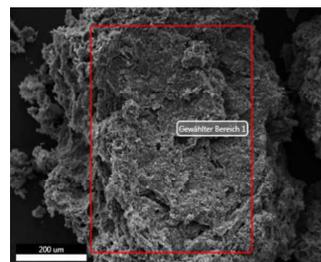
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	7.4	12.9	140.1	12.7	0.0105	1.1022	0.9449	0.1388	1.0000
O K	39.9	51.9	2536.9	9.2	0.0830	1.0564	0.9669	0.2139	1.0000
NaK	0.4	0.4	50.0	16.9	0.0015	0.9609	0.9935	0.3684	1.0062
MgK	1.6	1.4	326.1	7.6	0.0078	0.9776	1.0012	0.5303	1.0111
AlK	3.0	2.3	728.1	5.5	0.0176	0.9417	1.0085	0.6644	1.0184
SiK	28.1	20.8	7474.4	3.7	0.1895	0.9626	1.0153	0.7560	1.0068
P K	5.0	3.4	904.8	5.7	0.0268	0.9248	1.0218	0.6196	1.0079
NbL	0.7	0.2	65.9	14.0	0.0038	0.7446	1.2099	0.8103	1.0161
K K	0.6	0.3	112.8	12.3	0.0046	0.8933	1.0443	0.8946	1.0396
CaK	10.1	5.3	1630.9	2.6	0.0802	0.9097	1.0491	0.9282	1.0194
TiK	0.2	0.1	23.9	44.8	0.0013	0.8247	1.0577	0.9416	1.0379
FeK	2.6	1.0	213.2	6.6	0.0208	0.8116	1.0700	0.9921	1.0768
NiK	0.4	0.1	23.7	42.4	0.0031	0.8191	1.0726	0.9975	1.1115

Klaerschlam 20180802

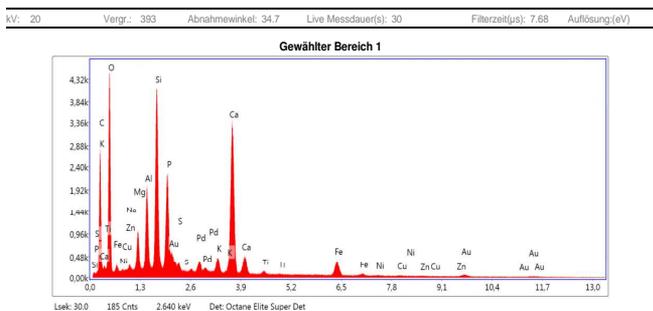
Autor: whitmore  
Erstellt: 08/02/2018 12:29:27 PM  
Probenbezeichnung: V7 Ash

Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1



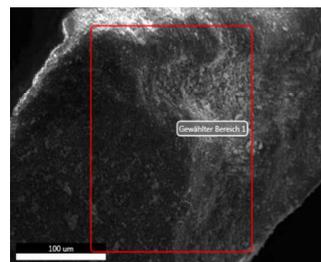
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	24.0	37.0	676.5	13.4	0.0514	1.0848	0.9523	0.2133	1.0000
O K	35.0	40.5	1651.8	9.8	0.0549	1.0393	0.9739	0.1634	1.0000
NaK	0.4	0.3	42.1	17.4	0.0012	0.9450	0.9999	0.3475	1.0043
MgK	2.1	1.6	394.2	7.5	0.0095	0.9614	1.0074	0.5067	1.0073
AlK	3.9	2.7	879.3	5.7	0.0215	0.9260	1.0145	0.6385	1.0108
SiK	8.4	5.6	2107.8	4.3	0.0543	0.9465	1.0211	0.7270	1.0111
P K	5.7	3.4	1217.4	4.3	0.0366	0.9093	1.0274	0.7491	1.0125
S K	0.5	0.3	104.1	9.6	0.0032	0.9273	1.0334	0.7919	1.0191
K K	1.1	0.5	220.7	9.0	0.0091	0.8782	1.0492	0.9469	1.0645
CaK	14.4	6.7	2353.2	2.0	0.1176	0.8943	1.0538	0.9663	1.0205
TiK	0.3	0.1	45.0	22.2	0.0025	0.8108	1.0621	0.9502	1.0395
FeK	3.4	1.1	271.5	5.5	0.0269	0.7978	1.0737	0.9948	1.0726
NiK	0.2	0.1	14.6	56.3	0.0019	0.8051	1.0758	0.9981	1.1059
CuK	0.3	0.1	14.2	56.5	0.0022	0.7838	1.0756	1.0010	1.1324
ZnK	0.2	0.0	7.5	58.4	0.0014	0.7612	1.0744	1.0029	1.1596

Klaerschlam 20180802

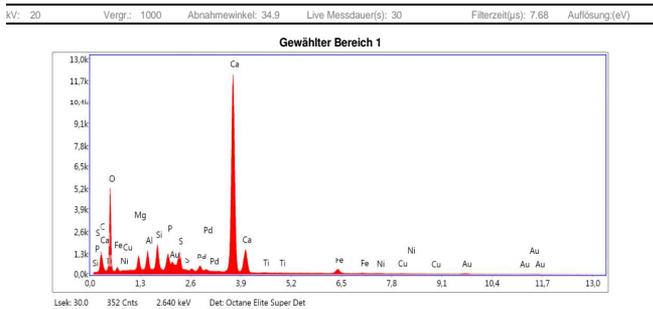
Autor: whitmore  
Erstellt: 08/02/2018 12:35:52 PM  
Probenbezeichnung: V7 Bed

Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1



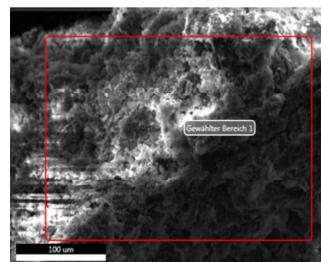
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	5.3	10.1	255.0	10.5	0.0155	1.1158	0.9308	0.2727	1.0000
O K	40.5	57.2	1999.3	10.0	0.0533	1.0703	0.9536	0.1290	1.0000
Mg K	2.1	1.9	447.7	8.0	0.0087	0.9916	0.9892	0.4457	1.0068
Al K	2.2	1.8	596.3	6.7	0.0117	0.9554	0.9968	0.5802	1.0112
Si K	2.6	2.1	838.1	5.5	0.0174	0.9768	1.0040	0.6933	1.0173
P K	2.1	1.6	630.7	5.0	0.0152	0.9386	1.0108	0.7755	1.0268
S K	2.3	1.6	744.1	4.7	0.0185	0.9574	1.0172	0.8406	1.0394
Ca K	39.8	22.4	8668.3	1.6	0.3483	0.9240	1.0397	0.9820	1.0127
Ti K	0.1	0.1	18.1	56.6	0.0008	0.8380	1.0490	0.8861	1.0250
Fe K	2.3	0.9	228.9	7.3	0.0182	0.8252	1.0627	0.9683	1.0568
Ni K	0.3	0.1	27.6	36.5	0.0029	0.8332	1.0661	0.9826	1.0826
Cu K	0.3	0.1	17.7	55.8	0.0022	0.7907	1.0666	0.9885	1.1054

475X 20180807

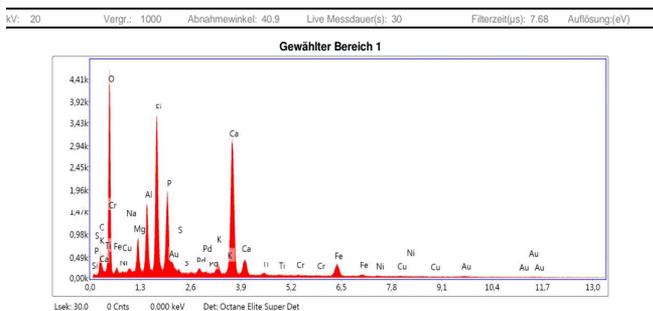
Autor: whitmore  
Erstellt: 08/07/2018 9:09:38 AM  
Probenbezeichnung: V8 Ash

Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1



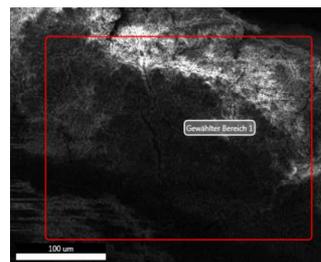
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	5.2	9.3	97.0	18.6	0.0100	1.1130	0.9379	0.1841	1.0000
O K	41.4	56.3	1748.0	9.5	0.0829	1.0672	0.9603	0.1979	1.0000
Na K	0.5	0.5	40.4	17.4	0.0018	0.9712	0.9875	0.3521	1.0045
Mg K	2.7	2.4	359.3	7.5	0.0130	0.9882	0.9954	0.5084	1.0075
Al K	4.9	3.9	763.2	5.8	0.0281	0.9520	1.0028	0.6326	1.0112
Si K	10.8	8.4	1859.5	4.4	0.0724	0.9733	1.0098	0.7150	1.0113
P K	7.3	5.1	1044.2	4.5	0.0476	0.9351	1.0164	0.7289	1.0128
S K	0.3	0.2	39.4	17.9	0.0019	0.9537	1.0227	0.7698	1.0199
K K	1.1	0.6	151.2	10.6	0.0096	0.9035	1.0395	0.9323	1.0694
Ca K	19.9	10.8	2200.6	2.1	0.1686	0.9202	1.0445	0.9543	1.0190
Ti K	0.4	0.2	40.4	25.2	0.0034	0.8344	1.0535	0.9330	1.0367
Cr K	0.3	0.1	20.3	43.9	0.0023	0.8261	1.0609	0.9667	1.0644
Fe K	4.5	1.7	240.0	5.3	0.0366	0.8214	1.0665	0.9857	1.0640
Ni K	0.4	0.1	15.4	56.3	0.0031	0.8292	1.0695	0.9910	1.0914
Cu K	0.4	0.1	14.6	56.2	0.0035	0.7868	1.0697	0.9949	1.1153

475X 20180807

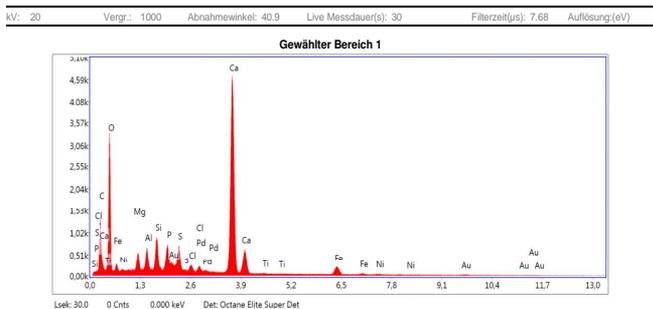
Autor: whitmore  
Erstellt: 08/07/2018 9:11:17 AM  
Probenbezeichnung: V8 Bed

Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1



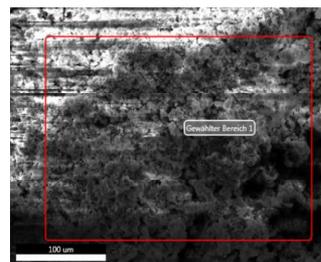
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	11.5	19.9	307.9	9.6	0.0338	1.1023	0.9391	0.2786	1.0000
O K	42.1	54.5	1305.9	9.9	0.0658	1.0569	0.9614	0.1549	1.0000
Mg K	1.7	1.4	197.9	8.5	0.0076	0.9787	0.9963	0.4864	1.0063
Al K	1.8	1.3	253.9	7.1	0.0099	0.9428	1.0037	0.6228	1.0105
Si K	2.5	1.8	413.3	5.8	0.0171	0.9639	1.0107	0.7335	1.0158
P K	2.3	1.6	355.1	5.2	0.0172	0.9261	1.0173	0.8091	1.0239
S K	2.2	1.4	351.5	6.3	0.0176	0.9446	1.0236	0.8650	1.0346
Cl K	0.6	0.4	95.7	11.9	0.0052	0.8988	1.0295	0.9038	1.0538
Ca K	31.1	16.1	3330.7	1.7	0.2715	0.9114	1.0453	0.9852	1.0152
Ti K	0.2	0.1	12.5	56.7	0.0011	0.8264	1.0542	0.9210	1.0300
Fe K	3.5	1.3	176.0	6.3	0.0286	0.8136	1.0671	0.9812	1.0592
Ni K	0.5	0.2	20.9	36.1	0.0045	0.8213	1.0700	0.9892	1.0850

475X 20180807

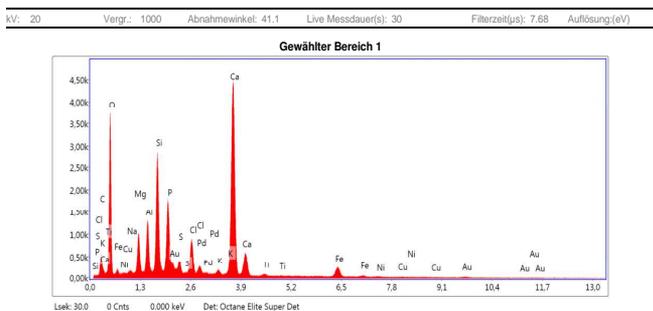
Autor: whitmore  
Erstellt: 08/07/2018 9:12:43 AM  
Probenbezeichnung: V9 Ash

Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1



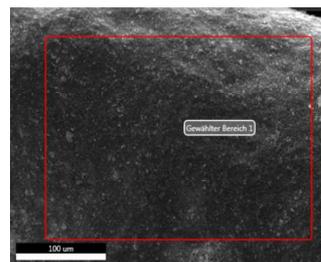
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	4.6	8.7	92.9	13.3	0.0089	1.1204	0.9325	0.1806	1.0000
O K	37.8	53.7	1457.5	9.8	0.0642	1.0746	0.9552	0.1659	1.0000
Na K	0.5	0.5	39.2	17.4	0.0016	0.9782	0.9827	0.3495	1.0043
Mg K	3.2	3.0	453.8	7.2	0.0153	0.9955	0.9907	0.5055	1.0072
Al K	3.6	3.0	600.8	6.0	0.0206	0.9591	0.9983	0.6258	1.0113
Si K	7.8	6.3	1460.4	4.4	0.0529	0.9805	1.0054	0.7199	1.0136
P K	6.1	4.5	986.3	4.3	0.0418	0.9422	1.0122	0.7558	1.0173
S K	1.1	0.8	182.9	8.5	0.0080	0.9610	1.0186	0.7983	1.0264
Cl K	3.1	2.0	508.4	4.6	0.0243	0.9145	1.0246	0.8582	1.0365
K K	0.4	0.2	62.5	16.0	0.0037	0.9105	1.0358	0.9294	1.0841
Ca K	27.0	15.3	3237.3	2.0	0.2309	0.9274	1.0409	0.9548	1.0159
Ti K	0.4	0.2	40.4	27.3	0.0032	0.8410	1.0501	0.9155	1.0306
Fe K	3.7	1.5	214.6	5.9	0.0305	0.8280	1.0636	0.9789	1.0606
Ni K	0.5	0.2	21.2	38.2	0.0040	0.8360	1.0669	0.9875	1.0865
Cu K	0.3	0.1	11.8	56.3	0.0027	0.7933	1.0674	0.9921	1.1099

475X 20180807

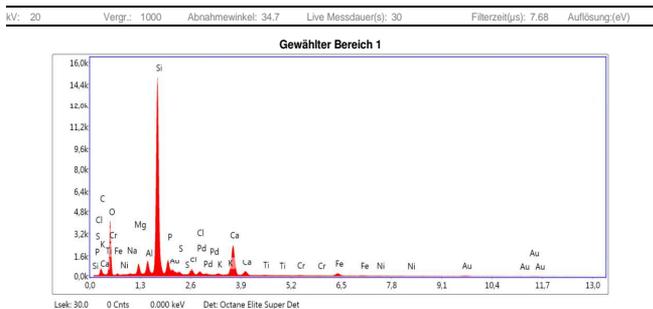
Autor: whitmore  
Erstellt: 08/07/2018 9:15:17 AM  
Probenbezeichnung: V9 Bed

Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1



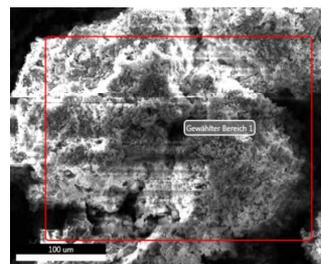
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	6.9	12.5	97.6	100.0	0.0088	1.1105	0.9400	0.1229	1.0000
O K	32.8	44.9	1570.2	9.6	0.0616	1.0647	0.9623	0.1891	1.0000
Na K	0.0	0.0	4.5	66.7	0.0002	0.9687	0.9892	0.3853	1.0069
Mg K	1.7	1.6	309.6	7.6	0.0088	0.9856	0.9971	0.5520	1.0125
Al K	2.1	1.7	451.5	6.2	0.0131	0.9495	1.0045	0.6822	1.0217
Si K	33.8	26.4	7882.9	3.4	0.2399	0.9706	1.0114	0.7789	1.0069
P K	4.3	3.0	628.0	6.3	0.0223	0.9325	1.0180	0.5955	1.0089
S K	0.7	0.5	121.9	11.2	0.0045	0.9510	1.0242	0.6716	1.0133
Cl K	1.6	1.0	267.0	8.3	0.0106	0.9049	1.0301	0.7591	1.0189
K K	0.4	0.2	62.7	17.7	0.0031	0.9008	1.0409	0.8787	1.0416
Ca K	12.4	6.8	1684.0	2.6	0.0994	0.9174	1.0459	0.9165	1.0180
Ti K	0.2	0.1	20.8	55.7	0.0014	0.8318	1.0547	0.9279	1.0351
Cr K	0.3	0.1	28.9	37.6	0.0025	0.8235	1.0621	0.9657	1.0596
Fe K	2.4	0.9	163.0	8.1	0.0191	0.8187	1.0675	0.9861	1.0720
Ni K	0.4	0.1	19.4	55.4	0.0030	0.8264	1.0704	0.9941	1.1051

475X 20180807

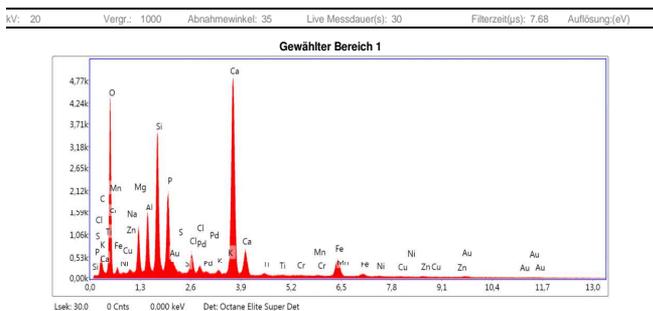
Autor: whitmore  
Erstellt: 08/07/2018 9:17:00 AM  
Probenbezeichnung: V10 Ash

Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1



eZAF Quant. Ergebnisse

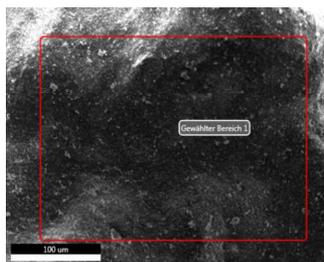
Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	1.7	3.4	36.6	24.0	0.0033	1.1308	0.9267	0.1787	1.0000
O K	38.5	57.0	1688.4	9.8	0.0674	1.0850	0.9497	0.1701	1.0000
Na K	0.2	0.3	19.7	31.7	0.0007	0.9880	0.9776	0.2996	1.0040
Mg K	3.5	3.4	508.0	7.7	0.0148	1.0055	0.9858	0.4437	1.0066
Al K	3.9	3.5	697.6	6.6	0.0206	0.9689	0.9934	0.5639	1.0103
Si K	8.9	7.5	1816.2	4.9	0.0564	0.9906	1.0007	0.8631	1.0118
P K	6.5	4.9	1142.5	4.8	0.0414	0.9519	1.0076	0.6990	1.0145
S K	0.1	0.1	14.2	59.0	0.0005	0.9710	1.0141	0.7488	1.0230
Cl K	1.6	1.1	302.8	6.8	0.0123	0.9241	1.0203	0.8255	1.0338
Pt L	0.8	0.2	80.0	16.8	0.0064	0.7401	1.2150	1.0297	1.0552
K K	0.3	0.2	48.2	19.9	0.0024	0.9202	1.0317	0.9145	1.0745
Ca K	24.5	14.5	3471.7	2.1	0.2093	0.9373	1.0369	0.9430	1.0192
Ti K	0.4	0.2	45.9	19.9	0.0031	0.8501	1.0464	0.9079	1.0380
Cr K	0.4	0.2	38.3	23.4	0.0034	0.8419	1.0544	0.9515	1.0658
Mn K	0.4	0.2	33.9	30.2	0.0035	0.8242	1.0577	0.9664	1.0614
Fe K	6.0	2.6	417.3	4.0	0.0499	0.8373	1.0605	0.9765	1.0614
Ni K	0.8	0.3	40.4	23.6	0.0064	0.8455	1.0642	0.9827	1.0852
Cu K	0.7	0.3	29.4	24.6	0.0056	0.8024	1.0648	0.9884	1.1024

Zn K	0.7	0.3	26.8	36.0	0.0061	0.8000	1.0644	0.9923	1.1207
------	-----	-----	------	------	--------	--------	--------	--------	--------

475X 20180807

Autor: whitmore  
Erstellt: 08/07/2018 9:18:24 AM  
Probenbezeichnung: V10 Bed

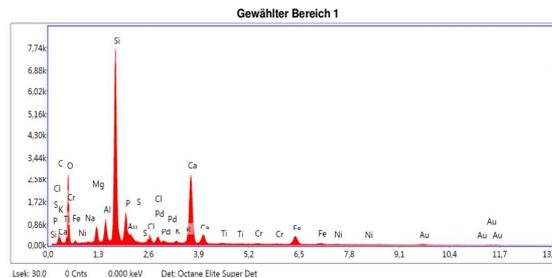
Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1

kV: 20 Vergr.: 1000 Abnahmwinkel: 34.9 Live Messdauer(s): 30 Filterzeit(µs): 7.68 Auflösung(Å):



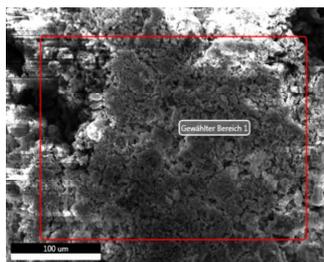
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	6.5	12.2	82.2	13.8	0.0095	1.1190	0.9345	0.1401	1.0000
O K	31.8	45.0	1084.1	9.9	0.0550	1.0731	0.9570	0.1723	1.0000
Na K	0.3	0.3	19.8	30.7	0.0009	0.9767	0.9844	0.3534	1.0056
Mg K	2.5	2.3	324.8	7.5	0.0120	0.9939	0.9924	0.5129	1.0097
Al K	3.0	2.6	472.1	6.2	0.0177	0.9575	0.9999	0.6378	1.0161
Si K	23.9	19.3	4112.0	4.0	0.1620	0.9789	1.0070	0.7331	1.0090
P K	5.9	4.3	732.0	5.7	0.0336	0.9406	1.0137	0.6362	1.0111
S K	0.2	0.1	26.2	29.0	0.0012	0.9593	1.0201	0.6981	1.0173
Cl K	1.4	0.9	192.3	10.5	0.0099	0.9128	1.0261	0.7837	1.0255
K K	0.3	0.2	33.3	25.6	0.0021	0.9089	1.0371	0.8942	1.0580
Ca K	18.4	10.4	1971.7	2.4	0.1508	0.9257	1.0422	0.9291	1.0186
Ti K	0.2	0.1	14.0	56.8	0.0012	0.8394	1.0513	0.9178	1.0369
Cr K	0.2	0.1	14.1	56.0	0.0016	0.8311	1.0589	0.9589	1.0655
Fe K	5.2	2.1	275.5	5.8	0.0418	0.8264	1.0647	0.9819	1.0602
Ni K	0.2	0.1	7.4	57.8	0.0015	0.8343	1.0679	0.9878	1.0903

475X 20180807

Autor: whitmore  
Erstellt: 08/07/2018 9:20:54 AM  
Probenbezeichnung: V11 Ash

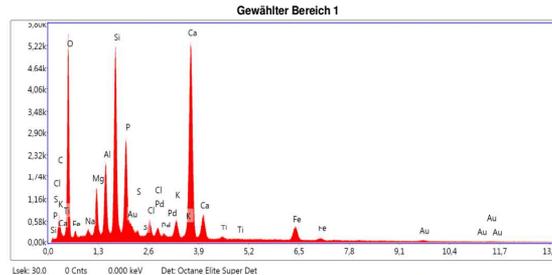
Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1

kV: 20 Vergr.: 1000 Abnahmwinkel: 35 Live Messdauer(s): 30 Filterzeit(µs): 7.68 Auflösung(Å):



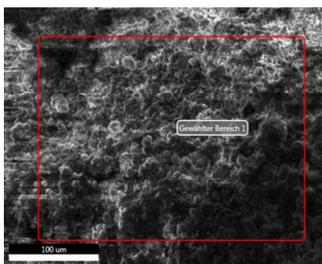
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	4.1	7.6	101.8	10.0	0.0077	1.1153	0.9366	0.1755	1.0000
O K	40.5	56.1	2107.0	9.6	0.0699	1.0695	0.9590	0.1700	1.0000
Na K	0.7	0.7	73.4	14.5	0.0022	0.9733	0.9862	0.3263	1.0046
Mg K	3.0	2.7	560.5	7.5	0.0136	0.9904	0.9942	0.4791	1.0076
Al K	4.2	3.5	948.5	6.0	0.0233	0.9541	1.0017	0.6028	1.0117
Si K	10.6	8.3	2660.2	4.5	0.0686	0.9754	1.0087	0.6943	1.0121
P K	7.0	5.0	1483.1	4.6	0.0446	0.9372	1.0153	0.7092	1.0142
S K	0.3	0.2	66.1	13.8	0.0021	0.9559	1.0217	0.7529	1.0223
Cl K	1.2	0.8	268.9	8.3	0.0091	0.9095	1.0276	0.8278	1.0333
K K	1.5	0.9	311.2	6.7	0.0129	0.9056	1.0386	0.9217	1.0721
Ca K	22.4	12.4	3757.5	2.1	0.1881	0.9223	1.0436	0.9450	1.0168
Ti K	0.4	0.2	48.9	25.7	0.0027	0.8363	1.0526	0.9152	1.0326
Fe K	4.1	1.6	333.7	4.8	0.0331	0.8233	1.0658	0.9806	1.0594

475X 20180807

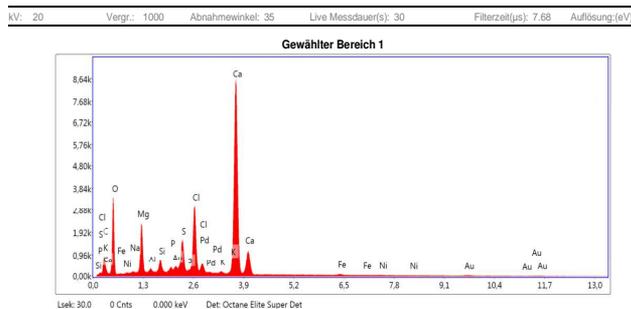
Autor: whitmore  
Erstellt: 08/07/2018 9:22:48 AM  
Probenbezeichnung: V11 Bed

Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1



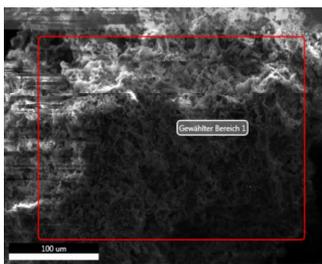
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	5.2	10.0	137.8	12.4	0.0107	1.1195	0.9303	0.1917	1.0000
O K	37.0	53.2	1380.9	10.2	0.0470	1.0739	0.9531	0.1235	1.0000
NaK	0.2	0.2	15.1	58.9	0.0005	0.9776	0.9807	0.3141	1.0042
MgK	5.7	5.4	1034.1	7.1	0.0257	0.9949	0.9888	0.4692	1.0061
AlK	0.3	0.3	72.6	12.7	0.0018	0.9586	0.9964	0.5704	1.0110
SiK	1.2	1.0	292.8	7.1	0.0078	0.9801	1.0036	0.6998	1.0178
P K	0.5	0.4	121.0	10.4	0.0037	0.9417	1.0104	0.7947	1.0296
S K	3.5	2.5	907.2	3.5	0.0289	0.9606	1.0168	0.8686	1.0411
ClK	8.0	5.2	1910.6	2.8	0.0662	0.9141	1.0230	0.8977	1.0469
K K	0.2	0.1	48.6	21.1	0.0021	0.9102	1.0342	0.9295	1.1107
CaK	37.3	21.4	6238.9	1.8	0.3206	0.9271	1.0393	0.9569	1.0112
FeK	0.5	0.2	38.0	27.7	0.0039	0.8279	1.0624	0.9661	1.0580
NiK	0.3	0.1	18.2	55.8	0.0025	0.8359	1.0659	0.9835	1.0861

475X 20180807

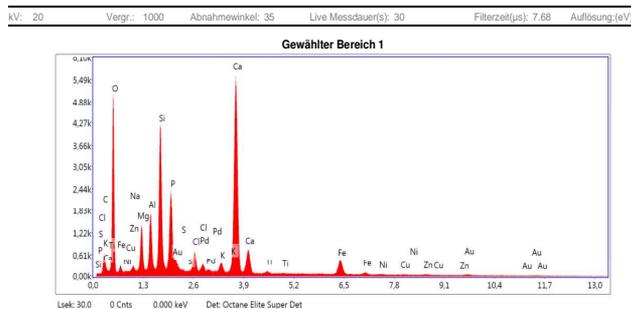
Autor: whitmore  
Erstellt: 08/07/2018 9:24:43 AM  
Probenbezeichnung: V12 Ash

Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1



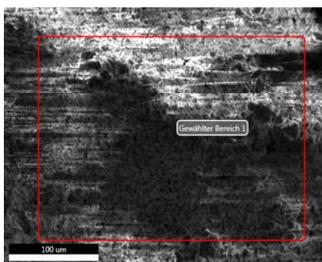
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	4.0	7.4	96.8	72.6	0.0078	1.1178	0.9343	0.1830	1.0000
O K	40.5	56.7	1963.6	9.7	0.0698	1.0721	0.9569	0.1665	1.0000
NaK	0.4	0.3	33.1	21.3	0.0010	0.9758	0.9842	0.3147	1.0043
MgK	3.3	3.0	565.7	7.5	0.0147	0.9930	0.9922	0.4653	1.0071
AlK	3.7	3.1	772.6	6.3	0.0203	0.9566	0.9998	0.5873	1.0111
SiK	9.1	7.3	2164.6	4.7	0.0598	0.9780	1.0069	0.6857	1.0124
P K	6.3	4.6	1291.9	4.6	0.0416	0.9397	1.0136	0.7144	1.0153
S K	0.1	0.1	21.4	52.4	0.0007	0.9585	1.0199	0.7617	1.0242
ClK	1.6	1.0	346.0	6.3	0.0125	0.9121	1.0259	0.8362	1.0356
K K	0.8	0.5	163.0	11.1	0.0072	0.9081	1.0370	0.9248	1.0802
CaK	24.4	13.7	3830.5	2.0	0.2108	0.9249	1.0421	0.9505	1.0172
TiK	0.3	0.2	42.6	26.6	0.0025	0.8387	1.0512	0.9124	1.0337
FeK	4.7	1.9	363.5	4.8	0.0386	0.8258	1.0646	0.9794	1.0605
NiK	0.3	0.1	15.4	56.5	0.0022	0.8337	1.0678	0.9868	1.0897
CuK	0.2	0.1	8.8	57.7	0.0015	0.7911	1.0682	0.9918	1.1125
ZnK	0.4	0.1	15.0	56.9	0.0031	0.7886	1.0675	0.9955	1.1346

475X 20180807

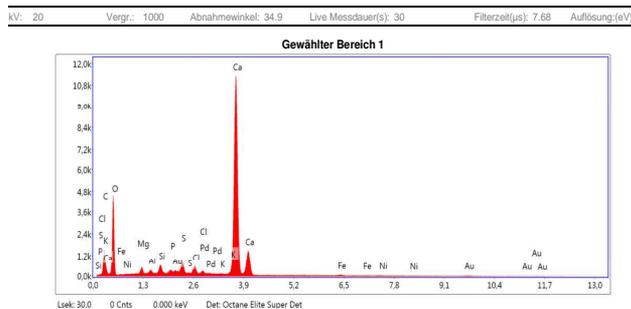
Autor: whitmore  
Erstellt: 08/07/2018 9:26:23 AM  
Probenbezeichnung: V12 Bed

Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1



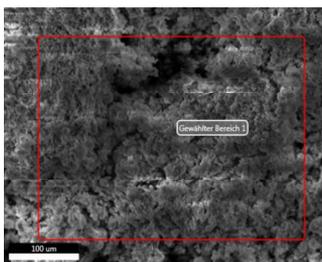
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	5.4	9.9	273.8	10.2	0.0192	1.1102	0.9326	0.3390	1.0000
O K	44.9	62.0	1831.3	10.1	0.0564	1.0649	0.9553	0.1235	1.0000
Mg K	0.8	0.7	143.9	9.9	0.0032	0.9864	0.9908	0.4348	1.0066
Al K	0.3	0.3	81.2	12.0	0.0018	0.9504	0.9984	0.5812	1.0119
Si K	0.9	0.7	253.1	7.5	0.0061	0.9717	1.0055	0.7112	1.0196
P K	0.4	0.3	117.6	10.3	0.0033	0.9337	1.0122	0.8070	1.0327
S K	1.3	0.9	388.8	6.1	0.0112	0.9523	1.0186	0.8794	1.0502
Cl K	1.1	0.7	296.9	6.9	0.0093	0.9062	1.0247	0.9215	1.0775
K K	0.1	0.1	29.0	34.1	0.0011	0.9024	1.0358	0.9776	1.1850
Ca K	43.6	24.0	8272.9	1.4	0.3843	0.9191	1.0409	0.9942	1.0112
Fe K	0.6	0.3	55.1	18.3	0.0051	0.8207	1.0637	0.9666	1.0575
Ni K	0.5	0.2	36.3	30.9	0.0045	0.8286	1.0670	0.9835	1.0830

475X 20180807

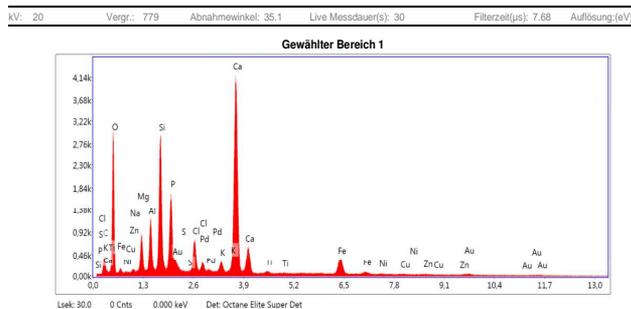
Autor: whitmore  
Erstellt: 08/07/2018 9:27:55 AM  
Probenbezeichnung: V13 Ash

Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1



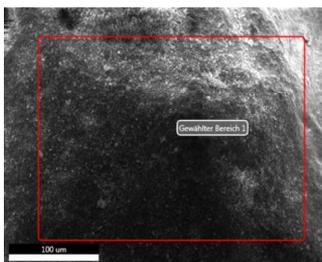
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	3.4	6.7	57.3	100.0	0.0060	1.1309	0.9265	0.1730	1.0000
O K	35.5	52.7	1195.0	9.9	0.0554	1.0851	0.9495	0.1583	1.0000
Na K	0.2	0.3	16.1	34.6	0.0007	0.9880	0.9774	0.3033	1.0040
Mg K	3.0	3.0	368.6	8.0	0.0125	1.0056	0.9856	0.4466	1.0067
Al K	3.6	3.2	534.4	6.7	0.0183	0.9689	0.9933	0.5704	1.0107
Si K	9.0	7.6	1528.2	4.9	0.0551	0.9907	1.0005	0.6713	1.0124
P K	6.4	4.9	935.0	4.9	0.0394	0.9520	1.0074	0.7046	1.0155
S K	0.1	0.0	8.4	60.7	0.0004	0.9711	1.0139	0.7538	1.0247
Cl K	2.8	1.9	425.7	5.1	0.0201	0.9241	1.0201	0.8296	1.0347
K K	1.0	0.6	138.3	12.1	0.0080	0.9203	1.0315	0.9150	1.0779
Ca K	25.6	15.2	2989.2	2.2	0.2095	0.9374	1.0368	0.9422	1.0185
Ti K	0.4	0.2	35.9	30.7	0.0028	0.8502	1.0463	0.9045	1.0365
Fe K	6.1	2.6	349.4	4.2	0.0485	0.8373	1.0604	0.9759	1.0639
Ni K	0.9	0.4	41.4	24.4	0.0077	0.8455	1.0641	0.9826	1.0863
Cu K	1.0	0.4	35.1	22.3	0.0077	0.8024	1.0647	0.9884	1.1009
Zn K	1.0	0.3	28.7	34.2	0.0077	0.8000	1.0643	0.9920	1.1176

475X 20180807

Autor: whitmore  
 Erstellt: 08/07/2018 9:29:33 AM  
 Probenbezeichnung: V13 Bed

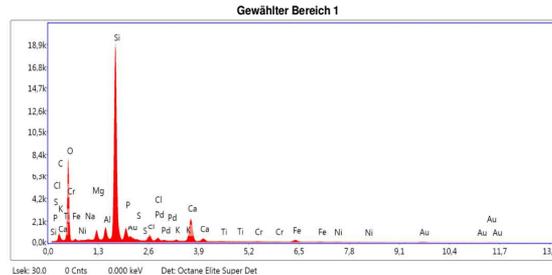
Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1

kV: 20 Vergr.: 1000 Abnahmwinkel: 35.1 Live Messdauer(s): 30 Filterzeit(µs): 7.68 Auflösung(êV)



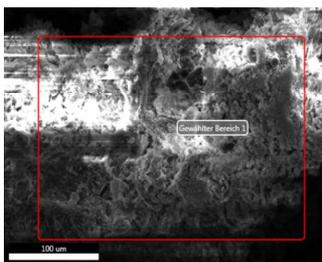
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	6.6	11.4	131.5	14.8	0.0088	1.1003	0.9464	0.1287	1.0000
O K	40.2	52.3	3023.1	9.1	0.0886	1.0544	0.9684	0.2211	1.0000
Na K	0.1	0.1	15.7	62.1	0.0004	0.9590	0.9948	0.3816	1.0068
Mg K	1.6	1.4	388.5	7.3	0.0083	0.9756	1.0025	0.5483	1.0124
Al K	2.0	1.5	559.1	5.8	0.0121	0.9398	1.0098	0.6810	1.0215
Si K	32.5	24.1	10156.5	3.4	0.2319	0.9606	1.0166	0.7802	1.0061
P K	3.5	2.3	693.2	6.2	0.0185	0.9228	1.0230	0.6050	1.0079
S K	0.3	0.2	74.3	13.3	0.0020	0.9411	1.0291	0.6846	1.0120
Cl K	1.6	0.9	346.4	7.2	0.0103	0.8954	1.0348	0.7729	1.0168
K K	0.3	0.2	65.4	16.9	0.0024	0.8912	1.0453	0.8883	1.0364
Ca K	9.0	4.7	1644.4	2.6	0.0729	0.9076	1.0501	0.9245	1.0189
Ti K	0.1	0.1	19.0	55.6	0.0009	0.8228	1.0586	0.9430	1.0369
Cr K	0.2	0.1	27.4	39.7	0.0018	0.8144	1.0657	0.9754	1.0626
Fe K	1.7	0.6	158.9	9.3	0.0140	0.8096	1.0708	0.9923	1.0798
Ni K	0.2	0.1	17.8	55.7	0.0021	0.8171	1.0733	0.9988	1.1179

475X 20180807

Autor: whitmore  
 Erstellt: 08/07/2018 9:31:12 AM  
 Probenbezeichnung: V14 Ash

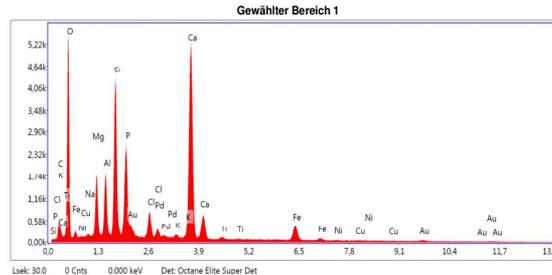
Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1

kV: 20 Vergr.: 1000 Abnahmwinkel: 35.3 Live Messdauer(s): 30 Filterzeit(µs): 7.68 Auflösung(êV)



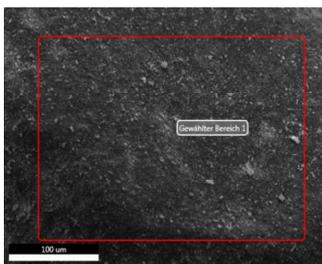
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	3.8	7.1	91.2	45.4	0.0071	1.1164	0.9356	0.1759	1.0000
O K	41.1	57.2	2107.5	9.6	0.0722	1.0706	0.9581	0.1739	1.0000
Na K	0.2	0.2	16.1	43.8	0.0005	0.9744	0.9854	0.3188	1.0045
Mg K	4.2	3.8	745.6	7.2	0.0187	0.9915	0.9934	0.4736	1.0071
Al K	3.8	3.1	798.8	6.2	0.0203	0.9552	1.0009	0.5868	1.0110
Si K	9.1	7.2	2165.2	4.7	0.0579	0.9766	1.0079	0.6844	1.0123
P K	6.8	4.9	1401.1	4.6	0.0437	0.9383	1.0146	0.7142	1.0147
Cl K	2.1	1.3	445.0	5.4	0.0156	0.9107	1.0269	0.8341	1.0335
K K	0.3	0.2	52.9	18.8	0.0023	0.9067	1.0379	0.9213	1.0771
Ca K	23.0	12.8	3726.4	2.0	0.1935	0.9235	1.0430	0.9503	1.0176
Ti K	0.3	0.1	41.9	27.2	0.0024	0.8374	1.0520	0.9168	1.0344
Fe K	4.6	1.8	359.2	4.7	0.0370	0.8244	1.0653	0.9812	1.0619
Ni K	0.3	0.1	20.6	55.7	0.0028	0.8322	1.0684	0.9881	1.0891
Cu K	0.4	0.1	19.4	55.5	0.0032	0.7897	1.0687	0.9928	1.1128

475X 20180807

Autor: whitmore  
Erstellt: 08/07/2018 9:33:15 AM  
Probenbezeichnung: V14 Bed

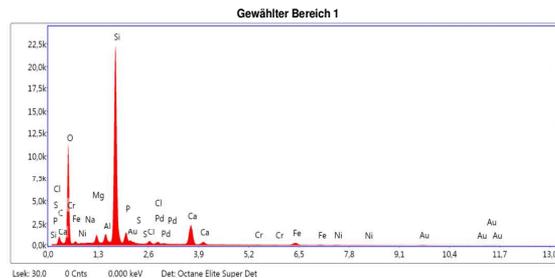
**Bereich 1**



Notizen:

Gewählter Bereich 1

kV: 20 Vergr.: 1000 Abnahmwinkel: 35.2 Live Messdauer(s): 30 Filterzeit(µs): 7.68 Auflösung(µV)



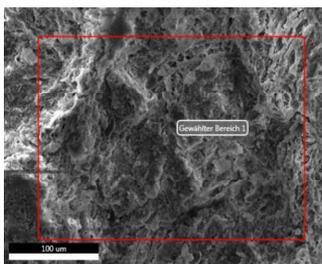
**eZAF Quant. Ergebnisse**

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	5.5	9.5	130.2	16.6	0.0076	1.0978	0.9480	0.1312	1.0000
O K	43.2	55.6	4082.5	8.8	0.1053	1.0519	0.9698	0.2413	1.0000
NaK	0.3	0.2	40.2	22.1	0.0009	0.9566	0.9962	0.3773	1.0068
MgK	1.6	1.3	428.4	7.1	0.0081	0.9732	1.0038	0.5423	1.0124
AlK	1.6	1.2	514.3	6.1	0.0098	0.9374	1.0110	0.6763	1.0217
SiK	33.2	24.4	11919.0	3.4	0.2398	0.9581	1.0178	0.7804	1.0056
PK	3.3	2.2	754.0	6.1	0.0177	0.9204	1.0242	0.6015	1.0072
SK	0.1	0.1	38.2	25.1	0.0009	0.9386	1.0302	0.6826	1.0110
ClK	0.8	0.5	201.6	10.7	0.0053	0.8930	1.0359	0.7723	1.0161
CaK	8.1	4.1	1699.7	2.6	0.0664	0.9051	1.0511	0.9284	1.0197
CrK	0.1	0.1	18.2	55.3	0.0011	0.8122	1.0665	0.9789	1.0673
FeK	2.0	0.7	213.1	7.8	0.0165	0.8073	1.0716	0.9947	1.0819
NiK	0.2	0.1	19.7	55.5	0.0020	0.8148	1.0740	0.9999	1.1211

475X 20180807

Autor: whitmore  
Erstellt: 08/07/2018 9:38:56 AM  
Probenbezeichnung: V15 Ash down

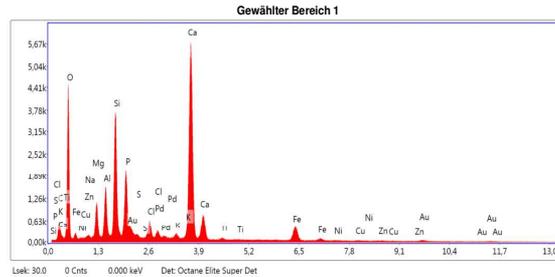
**Bereich 1**



Notizen:

Gewählter Bereich 1

kV: 20 Vergr.: 1000 Abnahmwinkel: 35.3 Live Messdauer(s): 30 Filterzeit(µs): 7.68 Auflösung(µV)



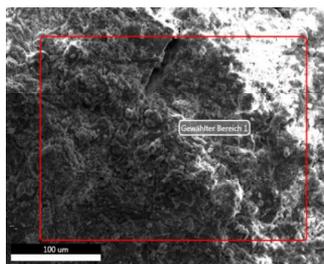
**eZAF Quant. Ergebnisse**

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	3.5	6.7	83.4	70.6	0.0069	1.1219	0.9313	0.1870	1.0000
O K	39.3	56.3	1756.0	9.7	0.0638	1.0762	0.9540	0.1616	1.0000
NaK	0.2	0.2	18.2	34.1	0.0006	0.9797	0.9816	0.3084	1.0042
MgK	3.0	2.8	481.8	7.7	0.0128	0.9970	0.9897	0.4571	1.0070
AlK	3.6	3.1	710.5	6.3	0.0191	0.9605	0.9973	0.5817	1.0109
SiK	8.8	7.2	1957.5	4.8	0.0555	0.9821	1.0044	0.6815	1.0126
PK	5.8	4.3	1112.9	4.7	0.0368	0.9436	1.0112	0.7144	1.0162
SK	0.3	0.2	55.6	14.9	0.0019	0.9625	1.0176	0.7656	1.0255
ClK	1.6	1.0	319.5	6.5	0.0119	0.9159	1.0237	0.8382	1.0378
KK	0.4	0.2	74.7	14.9	0.0034	0.9120	1.0349	0.9260	1.0872
CaK	26.6	15.2	4065.1	2.0	0.2238	0.9289	1.0401	0.9533	1.0173
TK	0.3	0.1	34.4	30.7	0.0021	0.8424	1.0493	0.9080	1.0341
FeK	5.2	2.1	379.4	4.5	0.0414	0.8295	1.0630	0.9775	1.0609
NiK	0.4	0.2	25.4	35.9	0.0037	0.8375	1.0664	0.9849	1.0873
CuK	0.5	0.2	22.4	44.6	0.0039	0.7948	1.0668	0.9903	1.1070
ZnK	0.5	0.2	19.3	56.0	0.0041	0.7923	1.0663	0.9940	1.1273

475X 20180807

Autor: whitmore  
 Erstellt: 08/07/2018 9:40:49 AM  
 Probenbezeichnung: V15 Bed

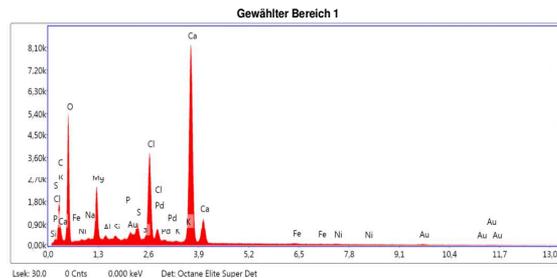
Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1

kV: 20 Vergr.: 1000 Abnahmewinkel: 35 Live Messdauer(s): 30 Filterzeit(µs): 7.68 Auflösung(µV)



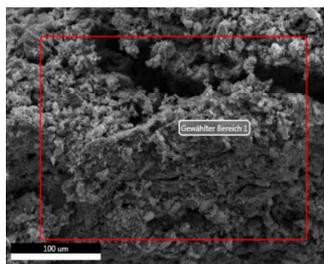
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	11.0	18.8	386.5	11.3	0.0250	1.1003	0.9417	0.2159	1.0000
O K	42.8	54.9	2116.6	9.9	0.0600	1.0549	0.9639	0.1391	1.0000
NaK	0.2	0.2	24.2	30.4	0.0006	0.9597	0.9908	0.3145	1.0039
MgK	5.0	4.2	1067.2	7.0	0.0221	0.9765	0.9986	0.4708	1.0057
AlK	0.3	0.2	80.6	12.6	0.0017	0.9407	1.0059	0.5789	1.0101
SiK	0.3	0.2	100.6	13.5	0.0022	0.9617	1.0128	0.7088	1.0169
P K	0.1	0.1	39.5	22.6	0.0010	0.9239	1.0194	0.8106	1.0283
S K	1.5	1.0	475.5	4.8	0.0126	0.9423	1.0255	0.8849	1.0422
ClK	8.1	4.7	2322.1	2.5	0.0670	0.8966	1.0314	0.9244	1.0443
K K	0.1	0.0	23.8	52.2	0.0008	0.8926	1.0421	0.9447	1.1045
CaK	29.8	15.3	5930.4	1.7	0.2540	0.9091	1.0470	0.9695	1.0124
FeK	0.4	0.2	39.7	27.6	0.0034	0.8113	1.0684	0.9777	1.0643
NiK	0.3	0.1	24.5	39.1	0.0028	0.8190	1.0712	0.9910	1.0944

475X 20180807

Autor: whitmore  
 Erstellt: 08/07/2018 9:42:18 AM  
 Probenbezeichnung: V16 Ash

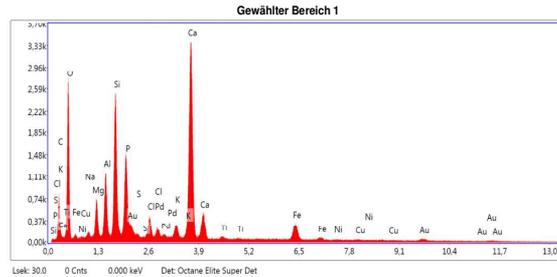
Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1

kV: 20 Vergr.: 1000 Abnahmewinkel: 35.1 Live Messdauer(s): 30 Filterzeit(µs): 7.68 Auflösung(µV)



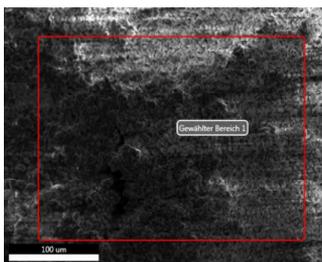
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	11.5	20.7	202.8	11.0	0.0216	1.1135	0.9358	0.1929	1.0000
O K	34.6	46.5	1082.3	10.0	0.0506	1.0679	0.9583	0.1574	1.0000
NaK	0.6	0.6	39.9	16.5	0.0017	0.9719	0.9855	0.3155	1.0040
MgK	2.6	2.3	306.3	8.0	0.0105	0.9891	0.9935	0.4651	1.0068
AlK	3.8	3.0	542.6	6.4	0.0188	0.9529	1.0010	0.5927	1.0105
SiK	8.0	6.2	1305.1	4.8	0.0476	0.9742	1.0081	0.6894	1.0122
P K	5.9	4.1	838.6	4.7	0.0356	0.9361	1.0147	0.7258	1.0150
S K	0.2	0.1	29.7	20.7	0.0013	0.9547	1.0210	0.7732	1.0237
ClK	1.6	0.9	225.3	7.2	0.0107	0.9085	1.0270	0.8449	1.0349
K K	1.2	0.6	158.3	10.1	0.0093	0.9046	1.0380	0.9302	1.0767
CaK	22.2	11.9	2451.7	2.1	0.1735	0.9213	1.0431	0.9531	1.0192
TiK	0.4	0.2	38.5	27.7	0.0030	0.8355	1.0521	0.9201	1.0374
FeK	5.4	2.1	289.0	4.6	0.0405	0.8226	1.0654	0.9823	1.0652
NiK	0.8	0.3	33.8	27.4	0.0063	0.8305	1.0685	0.9877	1.0857
CuK	1.1	0.4	38.0	16.3	0.0084	0.7881	1.0688	0.9925	1.1044

475X 20180807

Autor: whitmore  
 Erstellt: 08/07/2018 9:44:10 AM  
 Probenbezeichnung: V16 Bed

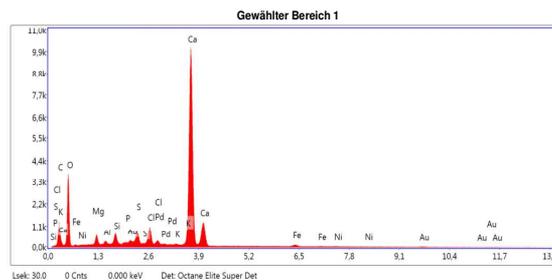
Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1

kV: 20 Vergr.: 1000 Abnahmwinkel: 35 Live Messdauer(s): 30 Filterzeit(µs): 7.68 Auflösung(µV)



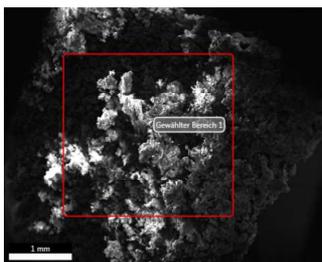
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	7.0	12.8	291.9	10.5	0.0228	1.1117	0.9319	0.3048	1.0000
O K	41.8	57.8	1517.2	10.2	0.0520	1.0663	0.9546	0.1207	1.0000
MgK	1.2	1.1	202.4	9.3	0.0051	0.9879	0.9902	0.4415	1.0065
AlK	0.3	0.2	63.2	14.3	0.0016	0.9518	0.9978	0.5842	1.0117
SiK	1.1	0.9	294.3	6.8	0.0078	0.9731	1.0049	0.7141	1.0191
P K	0.2	0.2	58.8	15.4	0.0018	0.9350	1.0117	0.8068	1.0320
S K	1.5	1.0	399.3	5.3	0.0128	0.9537	1.0181	0.8806	1.0487
ClK	2.5	1.6	624.8	4.0	0.0218	0.9076	1.0242	0.9212	1.0710
K K	0.1	0.1	32.5	30.2	0.0014	0.9037	1.0354	0.9701	1.1692
CaK	42.8	23.7	7367.3	1.5	0.3808	0.9205	1.0405	0.9884	1.0114
FeK	1.1	0.4	84.9	16.7	0.0087	0.8220	1.0633	0.9663	1.0561
NiK	0.4	0.1	23.1	41.2	0.0032	0.8299	1.0667	0.9828	1.0824

Klaerschlamm 20180802

Autor: whitmore  
 Erstellt: 08/02/2018 12:40:40 PM  
 Probenbezeichnung: V16 Ablagerung

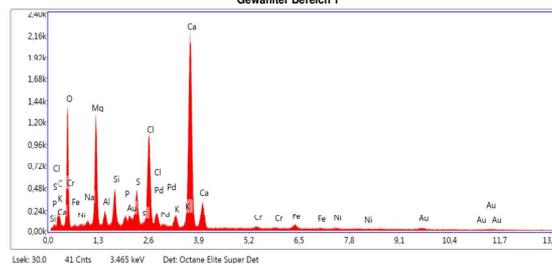
Bereich 1



Notizen:

Gewählter Bereich 1

kV: 20 Vergr.: 70 Abnahmwinkel: 32.9 Live Messdauer(s): 30 Filterzeit(µs): 7.68 Auflösung(µV)



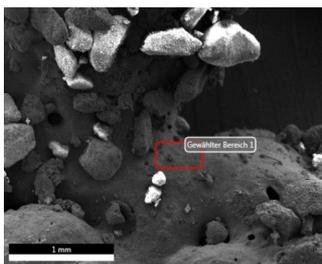
eZAF Quant. Ergebnisse

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	4.1	7.7	30.4	17.4	0.0072	1.1193	0.9330	0.1700	1.0000
O K	37.7	53.7	521.4	10.5	0.0531	1.0735	0.9557	0.1410	1.0000
NaK	0.5	0.5	16.6	26.5	0.0015	0.9772	0.9831	0.3124	1.0046
MgK	9.8	9.2	579.4	7.3	0.0422	0.9944	0.9912	0.4646	1.0057
AlK	1.3	1.1	84.2	10.3	0.0062	0.9580	0.9987	0.5298	1.0097
SiK	2.8	2.3	221.5	6.9	0.0171	0.9795	1.0058	0.6542	1.0144
P K	0.8	0.6	59.0	12.2	0.0053	0.9411	1.0126	0.7422	1.0235
S K	2.7	1.9	221.0	6.1	0.0205	0.9599	1.0189	0.8244	1.0334
ClK	8.1	5.2	613.0	3.9	0.0618	0.9134	1.0250	0.8695	1.0364
K K	1.2	0.7	78.8	12.5	0.0098	0.9095	1.0361	0.9131	1.0815
CaK	28.3	16.1	1557.1	2.3	0.2323	0.9263	1.0412	0.9405	1.0137
CrK	0.5	0.2	17.9	38.1	0.0040	0.8317	1.0581	0.9430	1.0451
FeK	1.6	0.6	42.2	20.1	0.0125	0.8270	1.0639	0.9713	1.0620
NiK	0.6	0.2	13.1	56.3	0.0051	0.8350	1.0672	0.9857	1.0884

Klaerschlamm 20180802

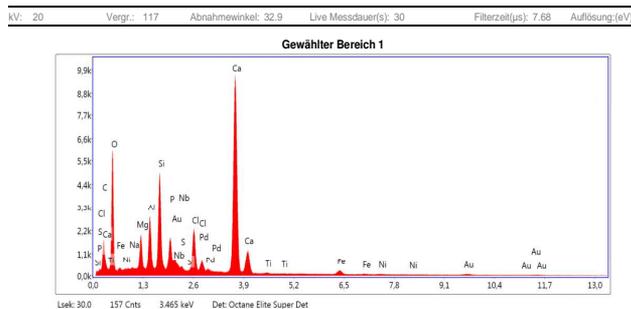
Autor: whitmore  
 Erstellt: 08/02/2018 12:49:45 PM  
 Probenbezeichnung: V16 Agglomerat

**Bereich 1**



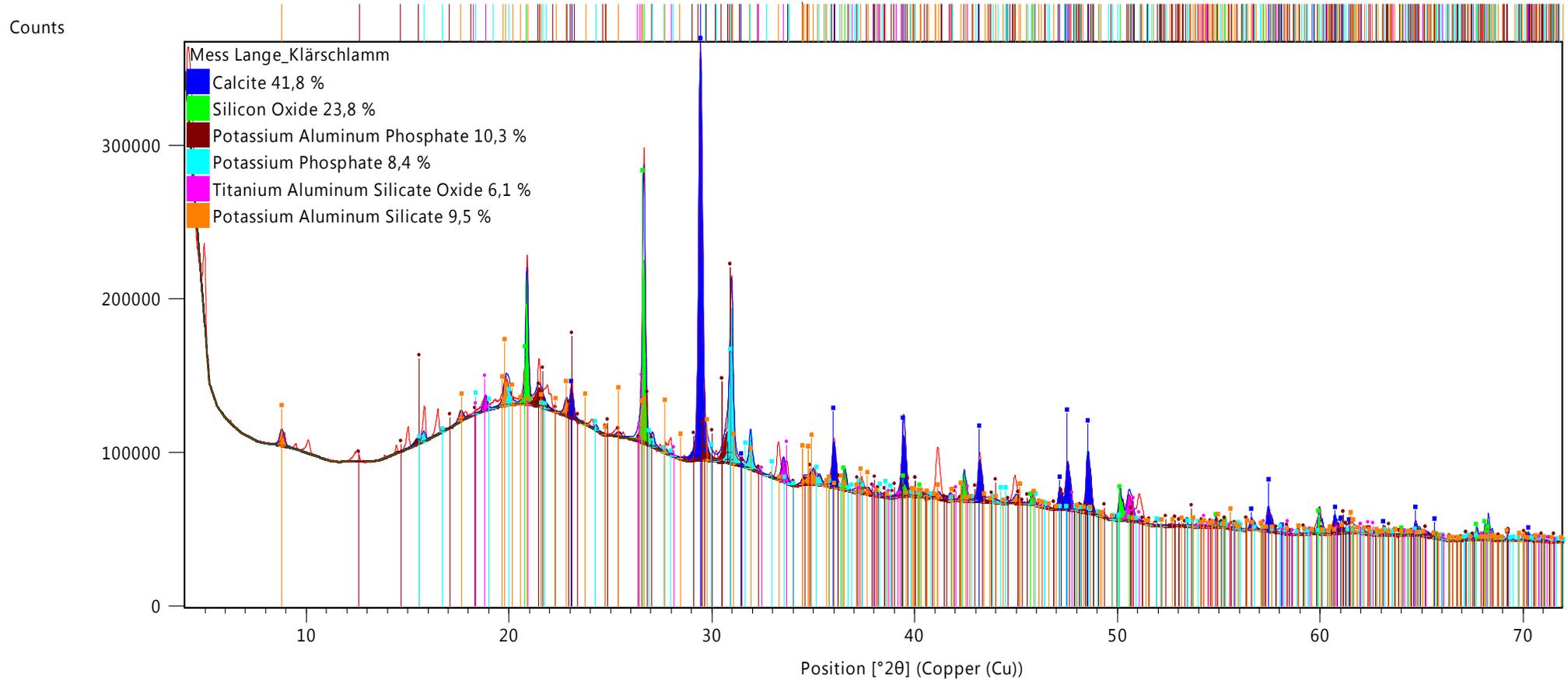
Notizen:

**Gewählter Bereich 1**



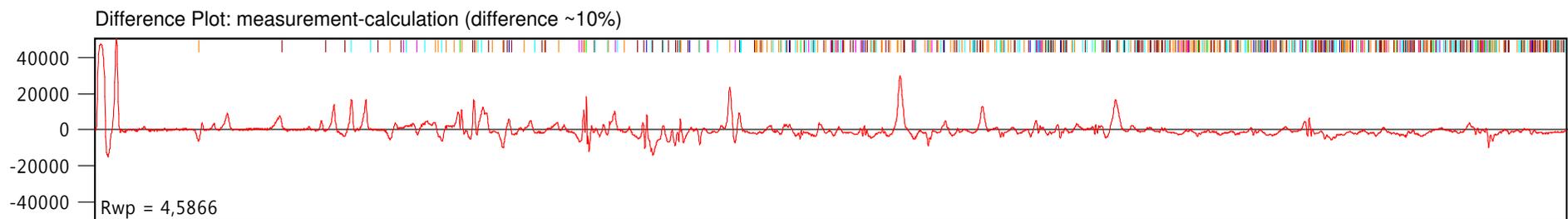
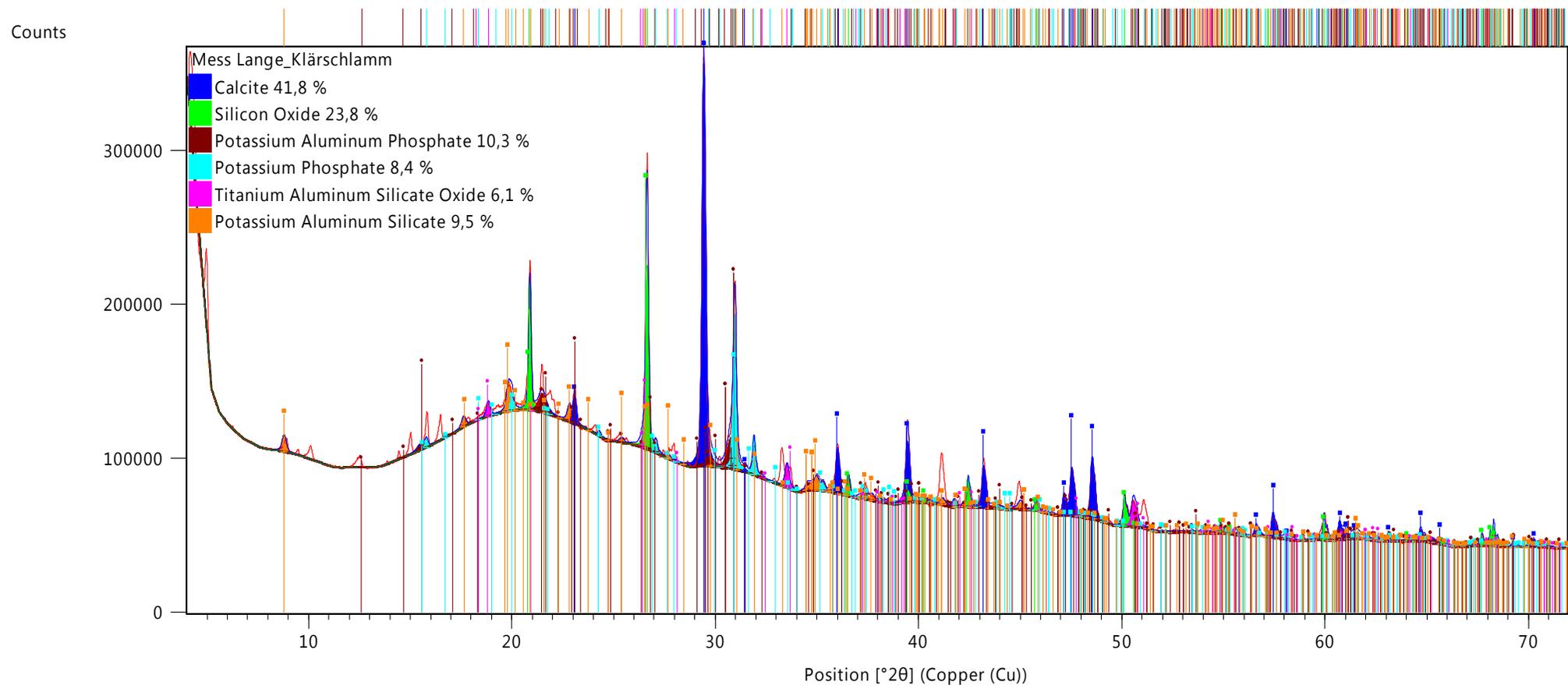
**eZAF Quant. Ergebnisse**

Element	Gewicht%	Atom%	Net. Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	7.7	13.8	283.7	11.1	0.0159	1.1100	0.9372	0.1987	1.0000
O K	39.6	53.6	2306.2	9.9	0.0556	1.0644	0.9596	0.1404	1.0000
NaK	0.2	0.2	26.8	36.1	0.0006	0.9686	0.9868	0.3102	1.0044
MgK	3.1	2.7	767.9	7.4	0.0132	0.9856	0.9947	0.4651	1.0072
AlK	4.0	3.2	1208.6	6.1	0.0211	0.9495	1.0022	0.5896	1.0110
SiK	6.9	5.3	2394.5	4.7	0.0438	0.9707	1.0092	0.6853	1.0135
P K	2.9	2.0	884.0	5.0	0.0188	0.9327	1.0158	0.7302	1.0199
NbL	0.2	0.1	41.4	37.7	0.0017	0.7511	1.2030	0.9605	1.0347
S K	0.2	0.1	54.3	18.6	0.0012	0.9513	1.0221	0.7974	1.0312
ClK	3.7	2.3	1192.0	3.8	0.0284	0.9052	1.0281	0.8643	1.0421
CaK	29.4	15.9	7002.6	1.8	0.2470	0.9179	1.0440	0.9608	1.0136
TiK	0.2	0.1	41.2	30.1	0.0016	0.8323	1.0530	0.9001	1.0263
FeK	1.5	0.6	174.6	8.9	0.0122	0.8194	1.0661	0.9751	1.0624
NiK	0.3	0.1	31.2	37.0	0.0029	0.8272	1.0691	0.9881	1.0916

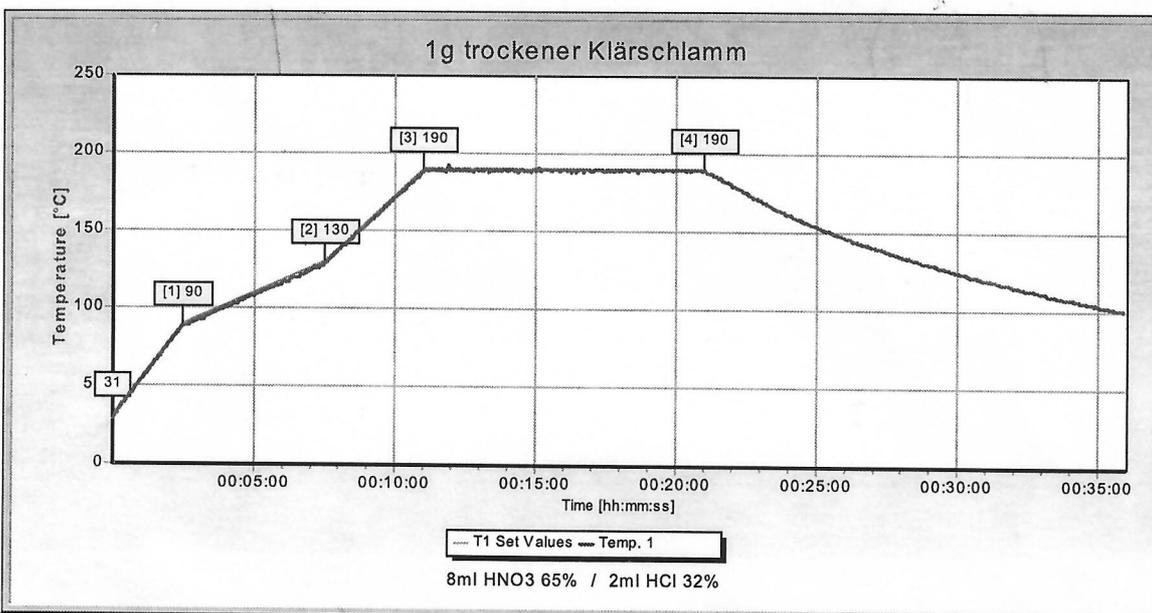


Separate Patterns

Residue + Peak List
04-012-0489; Ca ( C O3 ); Q: I; R-3c
04-001-9367; Si O2; Q: P;ALT; P3121
04-006-8574; K Al ( P2 O7 ); Q: I; P21/c
04-013-6916; K3 ( P O4 ); Q: I; Pnma
04-002-2651; Ti Al1.87 Si0.13 O5; Q: P; Cmcm
04-011-5944; K Al4 Si2 O12; Q: I; C2/c



Applikation: **E101 - Klärschlamm**  
 Erstellungsdatum: 27.08.99  
 Erstellt von: Applikationslabor Leutkirch – G. Kopp

**MW-Programm:**

Schritt 1:	00:02:30	800 Watt	T1: 90°C
Schritt 2:	00:05:00	500 Watt	T1: 130°C
Schritt 3:	00:03:30	1000 Watt	T1: 190°C
Schritt 4:	00:10:00	1000 Watt	T1: 190°C
Vent:	00:20:00		

**Einstellungen:**

TWIST Control:	an
Rotor Control:	aus
Magnetrührung:	0%

Die rein organische Einwaage sollte bei Verwendung von HCl nicht höher sein als 0,4g, weil sich sonst ein zu hoher Gasdruck aus Kohlendioxid und Chlor ergibt.

Soll nur auf Schwermetalle untersucht werden, kann als Alternative der Anteil HCl mit H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30% ersetzt werden. Daraus resultiert ein deutlich niedriger Druck und eine geringere Behälterbelastung in der Routine. Vor dem Verschließen einige Minuten stehen lassen, um Carbonate abreagieren zu lassen.

Gerät: START oder ETHOS easyCONTROL  
 Rotor: MPR oder HPR-Technik (vorzugsweise bei Verwendung von HCl)  
 Behälter: MPV-100 (#33806)  
 Kontrolle: ATC-CE-400 (#87834) & Q/P-Sensor (#33705) Q/P hat nicht angesprochen  
 => alle Behälter OK

Einwaage: 1g trockener Klärschlamm, (maximal 0,4g rein organische Einwaage)

Reagenzien: 8ml HNO<sub>3</sub> 65% + 2ml HCl 32%

Ergebnis: klare gelbe überstehende Lösung - evtl. Silikatrest

Wien Bibliothek verfügbar.  
biothek.

**Dräger**



ST-689-2002

## Richtiges Auswählen von Atemschutzgeräten

Dräger. Technik für das Leben®

## Einsatzempfehlungen Masken und Filter

HM = Halbmaske, VM = Vollmaske

Bereich/Wo?	Tätigkeit/Was?	Stoffe, Materialien/ Womit? Wovon?	
Allgemein	Umgang	mit Chemikalien	
	Probenahmen		
	Begehung		
	Messung		
	Anmischen	von Epoxid- und Polyesterharzen	
	Sprühen/Schmierern	Kühlschmierstoffnebel	
	Behandlung	mit Konservierungsmitteln	
	Transporte	von Gefahrgut	
	Reinigung	Hochdruck-Dampfstrahlen (Wasser)	
	Reinigung	Entfetten	
	Reinigen	desinfizieren	
	Reinigung	Desinfizieren mit aldehydhaltigen Mittel	
	Reinigung	Umgang mit Waschbenzin oder Nitroverdünnung (lösemittelhaltig)	
	Reinigung	mit Säuren	
		Bau	
		Gießen / Spritzen	von Beton, Zement (Fundamente)
Sanierung		Asbest-Arbeiten	
Schleifen, Schneiden, Bohren		an Mauerwerk, Beton, Stein und Putz	
Schleifen, Schneiden, Bohren		an Mauerwerk, Beton, Stein und Putz mit hohem Quarzanteil	
Schleifen, Schneiden, Bohren		von Zement	
Schleifen, Schneiden, Bohren		von Spachtelmasse oder Füller	
Straßenbelag		Teer	
Vollendung		Verarbeitung von Glas- und Mineralfaser, z. B. Dachisolierung	
Vollendung		Verputzen	
Vollendung	Versiegeln, abdichten		
Vollendung	Verklincern (Kleber)		
Vollendung	Dachdecken, Fliesenlegen		
Vorbereitung	Ausheben von kontaminiertem / verschmutztem Boden		
Vorbereitung	Allgemeine Abbrucharbeiten von Mauerwerk, Beton und Stein		

Schadstoffe	Maske*	Filter*
Partikel und zu identifizierende Stoffe	HM o. VM	ABEKHg-P3 <sup>1)</sup>
Partikel oder / und zu identifizierende Stoffe	HM	P3 / ABEKHg-P3 <sup>1)</sup>
Partikel und zu identifizierende Stoffe	HM	ABEK-P3 oder Fluchtgerät
Partikel oder / und zu identifizierende Stoffe	HM	P3 /ABEK-P3 <sup>1)</sup>
Organische Dämpfe	HM	A1
Ölpartikel	HM / FFP2	P2
unterschiedlich	HM	ABEK-P2
verschiedene	FM	ABEK2Hg-P3
Seifenlaugennebel mit abgesprühten Anhaftungen	HM / FFP1	P1
Fettpartikel	HM / FFP2	P2
organische dampfen	HM	A1-P2
Organische und anorganische Dämpfe	HM	AB-P2
Lösemitteldämpfe	HM	A2
Säuren	HM	ABE-P2
Betonstaub	HM / FFP2	P2
Asbestfasern	HM / FFP3	P3
Steinstäube	HM / FFP1	P1 <sup>2)</sup>
Steinstäube	HM / FFP2	P2
Staubpartikel	HM / FFP1	P1
Staubpartikel	HM / FFP1	P1 <sup>3)</sup>
Organische Dämpfe, Partikel	HM	A1-P2 / A2-P2 <sup>4)</sup>
Staubpartikel und Fasern	HM / FFP2	P2
feiner Putzstaub	HM / FFP2	P2
Organische Dämpfe	HM	A1-P2 / ABE1-P2
Organische Dämpfe	HM	A1-P2 <sup>5)</sup>
Fliesen- und Ziegelstaub	HM / FFP2	P2
Gase, Lösemittel, Staubpartikel	HM	ABE1-P2
Staubpartikel	HM / FFP2	P2



Bereich/Wo?	Tätigkeit/Was?	Stoffe, Materialien/ Womit? Wovon?
Holz- verarbeitung 	Entfernen von Farbe	Abflämmen von Altanstrichen
	Entfernen von Farbe	Abbeizen von Altanstrichen mit lösemittelhaltigen Mitteln
	Entfernen von Farbe	Abbeizen von Altanstrichen mit ammoniakhaltigen Substanzen
	Entfernen von Farbe	Abschleifen / Abbürsten von Altanstrichen/ -beschichtungen
	Entfernen von Farbe	Abschleifen / Abbürsten von chromhaltigen Altanstrichen/ -beschichtungen
	Entfernen von Klebstoff	Abkratzen, abschleifen von Klebstoffen, z. B. Polyesterharz
	Kleben	mit lösemittelhaltigen Stoffen
	Kleben	mit lösemittelhaltigen Stoffen (Sprühkleber, z. B. Polyesterharz)
	Kleben	mit starkem Epoxidharzkleber
	Schleifen, Schneiden, Boren	von Holz
Metall- verarbeitung 	Schleifen, Schneiden, Boren	von Buchen- oder Eichenholz
	Metall- Galvanisieren	
	Löten	
	Löten	zusätzlich mit Lötfett
	Schleifen, Schneiden, Boren	von Rost
	Schleifen, Schneiden, Boren	von Metallen
	Schleifen, Schneiden, Boren	von Eisen
	Schleifen, Schneiden, Boren	von Stahl
	Schleifen, Schneiden, Boren	von Edelstahl (hochlegiert)
	Schneiden	mit Laserstrahl
	Schweißen	von Aluminium
	Schweißen	von Kraftfahrzeugen
	Schweißen	Lichtbogenhandschweißen mit umhüllten Stabelektroden oder Laserstrahlschweißen
Schweißen, Nieten	von Baustahl und Zink	
Schweißen, Nieten	von Edelstahl (Thorium-Elektrode)	
Maler-/Lackier- arbeiten	Schleifen, Schneiden, Boren	von Farben, Lacken und Rostschutzanstrichen
	Schleifen, Schneiden, Boren	von Farben, Lacken und Rostschutzanstrichen (chromhaltig)

Schadstoffe	Maske*	Filter*
Gase, Dämpfe, Rauche, feine Partikel	HM o. VM	A1B1-P2
Lösemitteldämpfe	HM	A1 / ABEK <sup>5)</sup>
Lösemitteldämpfe Ammoniak	HM	ABEK
feine Farbpartikel	HM / FFP2	P2
feine Farbpartikel	VM / FFP3	P3
feine Partikel	HM / FFP2	P2
Lösemitteldämpfe	HM	A2
Klebstoffnebel, Lösemitteldämpfe	HM	A2-P2
Dämpfe	HM	A2-P2
Holzstaubpartikel	HM / FFP2	P2
Holzstaubpartikel	HM / FFP3	P3
evtl. Blausäure	HM	AB-P2
Rauchpartikel	HM / FFP2	P2
Rauchpartikel, Gase, evtl. Ammoniak	HM	ABEK-P2
Roststaub, Metallstaub	HM / FFP1/2	P1 / P2
Metallrauche	HM / FFP2/3	P2 / P3
Metallrauche	HM / FFP1	P1
Metallrauche	HM / FFP1/2	P1 / P2
Metallrauche	HM / FFP1/3	P2 / P3
Metallrauche	HM / FFP3	P3
Aluminiumoxidrauche, Ozon	HM / FFP3	P3 / A-P3 <sup>4)</sup>
Metallrauche, Ozon, Nox	HM	AB-P2
Metallstaub, Rauche	HM / FFP3	P3
Metallstaub, Schweißrauche	HM / FFP2	P2 / ABE1-P2 <sup>4)</sup>
Metallstaub, Metalloxidrauche	VM / FFP3	P3 / ABE1-P3 <sup>4)</sup>
feine Farbpartikel	HM / FFP2	P2
feine Farbpartikel	VM / FFP3	P3



Bereich/Wo?	Tätigkeit/Was?	Stoffe, Materialien/ Womit? Wovon?		
	Maler-/Lackierarbeiten	Schleifen, Schneiden, Boren		
		Spritzen, Lackieren	von Anti-Fouling-Lacken	
		Spritzen, Lackieren	mit wasserlöslichen Farben	
		Spritzen, Lackieren	mit wasserlöslichen Holzanstrichen, die Kupfer, Chrom oder Arsen enthalten	
		Spritzen, Lackieren	mit lösemittelhaltigen Farben, Kunstharzlacken und Bleichmitteln	
		Spritzen, Lackieren	von Dispersionsfarben	
		Spritzen, Lackieren	von Dispersionsfarben bei Vorliegen von Restlösemitteln oder Gerüchen	
			Spritzen, Lackieren	von Isocyanaten (lösemittelhaltig)
			Spritzen, Lackieren	mit Lacken und Holzschutzmitteln
			Streichen, Rollen	von wasserlöslichen Farben
		Streichen, Rollen	von lösemittelhaltigen Farben, Lacken und Holzschutzmitteln	
Kunststoffbearbeitung	Schleifen, Schneiden, Boren	von Kunststoffen		
	Entsorgung	Ausfegen	von Staub	
		Allgemeiner Umgang	Müllsortierung mit Auftreten von Gerüchen, Bakterien, Sporen	
Kraftwerksarbeiten	Allgemeiner Umgang	Schimmel / Pilzsporen-Umgang		
	Filterwechsel und Revision			
Landwirtschaft	Allgemeiner Umgang	Gülle-Arbeiten		
	Spritzen	von Pflanzenschutzmitteln (wässrige Lösungen)		
		Spritzen	von Pflanzenschutzmitteln (organisch / verdampfend)	
		Ausfegen	von Ställen	
	Reinigung, Gebrauch	von Tierfütterungssystemen		
	Reinigung, Entleerung	von Hühner- oder Schweinemistbehältern		
Medizin	Allgemeiner Umgang	Kontakt mit Bakterien		
	Allgemeiner Umgang	Kontakt mit Viren		
Schwimmbäder	Reinigung			
	Reinigung	zusätzlich Wasseraufbereitung mit Chlor		
Autowerkstätten	Kontakt	mit Dieselruß / Rauch		
	Reparatur	Austausch von Kupplungs- und Bremsbelegen		

- 1) Ausnahmen beachten
- 2) abh. von Konzentration
- 3) P2 falls ätzend
- 4) ja nach Konzentration

- 5) bei Niedersiedern AX
- 6) VM ja nach Konzentration
- 7) AB, wenn Gase entstehen können
- 8) FFP2 Odour für Gase unterhalb AGW

Schadstoffe	Maske*	Filter*
feine Farbpartikel	HM	A1-P3
feine Farbnebel	HM	A1-P2
feine Farbnebel	VM / FFP3	P3
Lösemitteldämpfe und -nebel	HM	A2-P2 <sup>5)</sup>
Farbpartikel	HM / FFP2	P2
Lösemitteldämpfe und Farbpartikel	HM	A2-P2
Lösemitteldämpfe und Farbpartikel	HM	A2-P2
organische Dämpfe	HM	A1-P2/A2-P2 <sup>4)</sup>
große Farbtropfen und -spritzer, Dämpfe	HM	A1 / A1-P2
Lösemitteldämpfe	HM	A1 / A1-P2 <sup>5)</sup>
Lösemitteldämpfe	HM	A1 / A1-P3
Kunststoffstäube	HM / FFP2	P2 / AB-P2 <sup>7)</sup>
Staubpartikel	HM / FFP3	P3
Gase und Staubpartikel	HM	A-P3
Pilzsporen	HM / VM / FFP2	P2 <sup>5)</sup>
belastete Staubpartikel	HM / FFP3	P3
Gase und Dämpfe	HM	ABEK
Insektizide / Pestizide	HM / FFP2	P2
Insektizide / Pestizide	HM	A1-P2
Staubpartikel	HM / FFP2 Odour	P2
Staubpartikel	HM / FFP2 Odour	P2
Staubpartikel, Ammoniak, H <sub>2</sub> S	HM	ABEK-P2 <sup>8)</sup>
Bakterien	HM / FFP2	P2
Viren	VM / FFP3	P3
Bakterien	HM / FFP2	P2
Bakterien und Gase	VM	AB2-P2
Rußpartikel	HM / FFP3	P3
Feinstaub, Asbest	HM / FFP2	P2



\* Bemerkungen

Diese Tabelle ist eine Orientierungshilfe bei der Auswahl des richtigen Atemschutzgerätes. Sie entbindet nicht von der Beachtung der nationalen Anwendungsregeln und Gesetze und ist kein Ersatz für die Beachtung und das Verstehen der den Produkten beiliegenden Gebrauchsanweisung.

**HAUPTSITZ:**

Dräger Safety AG & Co. KGaA  
Revalstraße 1  
23560 Lübeck, Deutschland

[www.draeger.com](http://www.draeger.com)

Diese Broschüre gibt Ihnen einen kurzen Überblick über die wichtigsten Faktoren, die beachtet werden müssen, wenn Sie ein Filtergerät auswählen. Diese Informationen helfen Ihnen, sich gegen Gesundheitsrisiken durch Schadstoffe in der Umgebungsluft wirkungsvoll zu schützen.

### 1. Was muss ich beachten, wenn ich ein Filtergerät auswähle?

Beschaffenheit und Konzentration der Gefahrstoffe sowie die Arbeitsbedingungen am Einsatzort müssen bekannt sein. Danach ist der notwendige Schutzfaktor des Filtergerätes zu bestimmen. Filter und Maske werden als Einheit angesehen. Bitte beachten Sie vor der Nutzung grundsätzlich die Gebrauchsanweisungen der Geräte

### 2. Prüfung folgender Punkte zu Ihren Einsatzbedingungen:

Ist ausreichend Sauerstoff in der Umgebungsluft vorhanden?

(Bitte lokale Vorschriften beachten - in Deutschland sind mindestens 17 Vol. % vorgeschrieben.)

Welche Schadstoffe gibt es in der Umgebungsluft?

Wie hoch sind deren Konzentrationen?

In welcher Form liegen die Schadstoffe vor: gasförmig, partikelförmig oder als Gemisch von beiden?

Haben die Schadstoffe geeignete Warneigenschaften, z. B. Geruch oder Geschmack?

Wo liegen die gültigen Grenzwerte (international OEL), z. B. AGW für Deutschland

Sind zusätzlich zum Atemschutz weitere Schutzausrüstungen erforderlich, z. B. Augen- oder Gehörschutz?

### 3. Welches Filtergerät benötige ich?

Nach Beantwortung aller o. g. Fragen ist der notwendige Schutzfaktor zu bestimmen. Tabelle 1 zeigt Ihnen die nominellen Schutzfaktoren (NPF) und die Faktoren für die maximale Einsatzkonzentration der einzelnen Filtergeräte. Der NPF wird abgeleitet von der höchst zulässigen Leckage des jeweiligen Gerätes gemäß den Anforderungen aus deren Europäischer Norm. Er gibt die mathematisch ermittelte maximale Schutzleistung eines Atemschutzgerätes an. Der Faktor für maximale Einsatzkonzentration ist die Praxisempfehlung in der BGR 190, abgeleitet (mit einem Sicherheitsabschlag) vom NPF. Diese Werte gelten für Deutschland. Zur Bestimmung des minimal notwendigen Schutzfaktors benötigen Sie die Konzentration und den Grenzwert des Schadstoffes. Ein Grenzwert (wie AGW) ist die Konzentration einer luftgetragenen Substanz in der Umgebungsatmosphäre, gemittelt über eine Referenzperiode, in der keine Beeinträchtigung der Gesundheit entsteht, wenn man dieser Substanz in dieser Konzentration täglich ausgesetzt ist.

Tabel 1: Liste der Atemschutzgeräte

Gerät	Bezeichnung	Nom. Schutzfaktor <sup>1)</sup>	Faktor für max. Einsatzkonzentr.
<b>Partikelfiltrierende Geräte</b>			
Filtrierende Halbmaske	FFP1	4	4
	FFP2	12	10
	FFP3	50	30
Viertel- oder Halbmaske mit Filter	P1	4	4
	P2	12	12
	P3	50	30
Vollmaske mit Filter	P1	5	4
	P2	20	15
	P3	1000	400
Gebläsefiltergerät mit Helm oder Haube	TH1P	10	5
	TH2P	20	20
	TH3P	500	100
Gebläsefiltergerät mit Viertel-/Halb- oder Vollmaske (Gerät eingeschaltet)	TM1P	20	10
	TM2P	100	100
	TM3P	2000	500
<b>Gasfiltrierende Geräte</b>			
Viertel- oder Halbmaske mit Filter		20	30
Vollmaske mit Filter		2000	400

1) Bitte beachten Sie, dass die Leistung, die durch den nominellen Schutzfaktor angegeben ist, nur bei richtiger Anwendung und Wartung des Atemschutzgerätes unter Beachtung der Gebrauchsanweisung erreicht werden kann. Die Größe muss passend für Ihr Gesicht sein, und das Gerät darf nur auf glatt rasierten Gesichtern getragen werden, da sonst Leckagen im Dichtlinienbereich entstehen können. Die Werte wurden der EN 529:2005 entnommen. Andere nationale oder lokale Richtlinien müssen beachtet werden.

### Beispiel: Bestimmung des benötigten Schutzfaktors

Schadstoff: Bleistaub (Partikelschutz nötig)

Konzentration am Arbeitsplatz: 3 mg/m<sup>3</sup>

Grenzwert (AGW): 0,1 mg/m<sup>3</sup>

Benötigter Schutzfaktor:

$$\frac{\text{Schadstoffkonzentration}}{\text{Grenzwert}} = \frac{3}{0,1} = 30$$

Sie sehen aus Tabelle 1, dass für diese Anwendung bei einem minimal benötigten Schutzfaktor von 30 (Bleistaub) ein P3-Filter eingesetzt werden muss, zusammen mit einer Halbmaske, Vollmaske oder einem Gebläsefiltergerät.

Für den Fall, dass der Schadstoff gas- und partikelförmig vorliegt, wird der nominelle Schutzfaktor für beide Formen getrennt berechnet. Zur Auswahl des Filtergerätes wird der höhere Schutzfaktor zu Grunde gelegt. Die Konzentration von Gasen wird in ppm (parts per million = Volumen der Substanz innerhalb 1m<sup>3</sup> Umgebungsluft) oder in mg/m<sup>3</sup> (= Gewicht einer Substanz innerhalb 1m<sup>3</sup> Umgebungsluft) gemessen und die Konzentration von Partikeln (Stäube) nur in mg/m<sup>3</sup>. Da mg/m<sup>3</sup> eine Gewichtsangabe ist und ppm eine Volumenangabe, gibt es keine direkte Umrechnung für mg/m<sup>3</sup> zu ppm. Höhere Konzentrationen werden oft in % pro Volumen angegeben, 10.000 ppm = 1 Vol.%.

#### 4. Bis zu welcher Schadstoffkonzentration darf das Filtergerät eingesetzt werden?

Sie können die maximal erlaubte Schadstoffkonzentration bestimmen, indem Sie den Faktor für die max. Einsatzkonzentration mit dem Grenzwert (AGW) des Schadstoffes multiplizieren.

---

$$\text{Max. Schadstoffkonzentration} = \frac{\text{Faktor max. Einsatzkonzentration} \times \text{Grenzwert}}{\text{Faktor max. Einsatzkonzentration}}$$

---

#### Beispiel: Bestimmung der maximalen Schadstoffkonzentration <sup>2)</sup>

Schadstoff:	Chlor
Grenzwert (AGW):	0,5 ppm
Atemschutz:	Vollmaske (Faktor max. Einsatzkonz. einer Vollmaske mit Gasfilter: 400)
Faktor x Grenzwert	= Maximale Schadstoffkonzentration
400 x 0,5	= 200 ppm oder 0,02 Vol.% Chlor

Die maximale Schadstoffkonzentration für Chlor bei Einsatz einer Vollmaske mit Gasfilter ist 200 ppm oder 0,02 Vol.% Chlor.

<sup>2)</sup> Werte und Berechnungen wurden der EN 529:2005 und der BGR 190 entnommen. Andere nationale oder lokale Vorschriften müssen beachtet werden. Als Grenzwerte wurden hier AGW zugrunde gelegt. Hierbei gelten die zeitlich gewichteten Durchschnittswerte über einen Referenzzeitraum und keine kurzfristigen Grenzwerte.

## 5. Wie finde ich den richtigen Filter?

Schadstoffe können in unterschiedlichen Formen auftreten, als Aerosole (Partikel oder Tröpfchen), als Gase oder Dämpfe. Je nach Auftreten müssen Sie sich gegen eine dieser Arten oder ein Gemisch daraus schützen.

Aerosole (Partikel):	Stäube, Fasern, Rauche, Mikroorganismen (z. B. Viren, Bakterien, Pilze und ihre Sporen) und Nebel
Gasförmige Stoffe:	Gase oder Dämpfe

Die folgende Tabelle zeigt Ihnen die Farbkodierung der Filter nach EN 14387. Diese hilft Ihnen den richtigen Filtertyp auszuwählen, der für den Einsatz gegen Ihren Schadstoff notwendig ist.

**Tabelle 2: Filter-Farbkennung**

Farbkennung	Filtertyp	Hauptanwendungsbereich
	AX <sup>3)</sup>	Gase und Dämpfe von organischen Verbindungen, Siedepunkt $\leq 65^\circ\text{C}$
	A	Gase und Dämpfe von organischen Verbindungen, Siedepunkt größer als $65^\circ\text{C}$
	B	Anorganische Gase und Dämpfe, z. B. Chlor, Schwefelwasserstoff, Cyanwasserstoff (Blausäure)
	E	Schwefeldioxid, Chlorwasserstoff
	K	Ammoniak und organische Ammoniak-derivate
	CO <sup>4)</sup>	Kohlenstoffmonoxid
	Hg <sup>5)</sup>	Quecksilber-Dampf
	NO <sup>6)</sup>	Nitrose Gase einschließlich Stickstoffmonoxid
	Reaktor <sup>7)</sup>	Radioaktives Iod einschließlich radioaktivem Iodmethan
	P	Partikel

3) AX-Filter dürfen nur im Anlieferungszustand (fabrikfrisch) verwendet werden.

Wiederverwendung und Verwendung gegen Gasgemische ist absolut unzulässig.

4) CO-Filter dürfen nur einmal verwendet werden und sind nach Verwendung zu entsorgen.

Anweisungen nach lokalen Richtlinien müssen beachtet werden.

5) Hg-Filter dürfen gem. EN 14387 nur für maximal 50 Stunden eingesetzt werden.

6) NO-Filter dürfen nur einmal verwendet werden und sind nach Verwendung zu entsorgen.

7) Reaktor-Filter: Anweisungen nach lokalen Richtlinien müssen beachtet werden.



## Unterscheidung von Filtertypen

Filter sind in unterschiedliche Klassen nach ihrer Kapazität (Gasfilter) oder ihrer Effizienz (Partikelfilter) eingeteilt (Tabelle 3). Gasfilter der Klasse 2 dürfen bei höheren Konzentrationen oder für längere Zeit eingesetzt werden als Klasse 1-Filter. Die Klasse

von Partikelfiltern zeigt an, wie effizient der Filter Partikel aus der Umgebungsluft herausfiltert (Klasse 1: 80%, Kl. 2: 94%, Kl. 3: 99,95%).

**Tabelle 3: Unterscheidung von Filtertypen**

Filter- typ	Filter- klasse	Schutz gegen	Höchstzulässige Schadstoffkonzentration
Gasfilter		Gase und Dämpfe	
		Kapazität:	30 x Grenzwert mit Halbmasken / 400 x Grenzwert mit Vollmasken, jedoch maximal:
	1	klein	0,1 vol. % (1000 ppm) <sup>8)</sup>
	2	mittel	0,5 vol. % (5000 ppm) <sup>8)</sup>
Gebrauch in Gebläse	1	klein	0,05 vol. % (500 ppm) <sup>9)</sup>
	2	mittel	0,1 vol. % (1000 ppm) <sup>9)</sup>
Partikel- filter		Partikel	
		Effizienz	(Abscheideleistung)
	1	klein	4 x Grenzwert <sup>10)</sup>
	2	mittel	10 x Grenzwert mit Halbmasken / 15 x Grenzwert mit Vollmasken <sup>10)</sup>
	3	groß	30 x Grenzwert mit Halbmasken / 400 x Grenzwert mit Vollmasken <sup>10)</sup>
Beispiel: Bleistaub MAK = 0,1 mg/m <sup>3</sup> 4 x 0,1 mg/m <sup>3</sup> = 0,4 mg/m <sup>3</sup> = max. erlaubte Konzentration von Bleistaub beim Gebrauch von P1-Filtern.			
Kombi- nations- filter		Gase, Dämpfe, Partikel	
	1-P2	Entsprechende	
	2-P2	Kombination	Entsprechende
	1-P3	aus Gas- und	Kombinations-
	2-P3	Partikelfilter	werte

<sup>8)</sup> Werte entnommen aus der Europäischen Norm EN 14387

<sup>9)</sup> Werte entnommen aus den Europäischen Normen EN 12941 und 12942

<sup>10)</sup> Werte entnommen aus der BGR 190

Andere nationale und lokale Richtlinien müssen beachtet werden.

**Beispiel Filtertyp:**



**Dieser Filter ist geeignet für den Einsatz gegen:**

**A** Gase und Dämpfe von organischen Verbindungen mit einem Siedepunkt größer als 65 °C bis Konzentrationen der

Filterklasse 2 (max. 5000 ppm) und

**B** Gase und Dämpfe von anorganischen Stoffen wie Chlor, Schwefelwasserstoff und Blausäure bis Konzentrationen der Filterklasse 2 (max. 5000 ppm) und

**P** Partikel bis Konzentrationen der Filterklasse 3.

## 6. Beachten Sie im Einsatz unbedingt folgende Hinweise:

### Benutzen Sie nie ein Filtergerät . . .

- in Umgebungen mit einem zu geringen Sauerstoffgehalt (lokale Vorschriften sind zu beachten, in Deutschland z. B. bei weniger als 17 Vol.% O<sub>2</sub>)
- in schlecht belüfteten Räumen oder Behältern wie Tanks, kleine Räume, Tunnel, Schiffe
- in Umgebungen, in denen die Konzentrationen der Schadstoffe unbekannt sind oder unmittelbar gefährlich für Leben oder Gesundheit (IDLH)
- bei Schadstoffkonzentrationen größer als die maximal erlaubte Konzentration und / oder die Filterleistung
- wenn der Schadstoff schlechte oder gar keine Warneigenschaften (Geruch, Geschmack, Irritationen) hat, wie z. B. Anilin, Benzol, Kohlenstoffmonoxid und Ozon.

### Verlassen Sie sofort den Bereich, wenn . . .

- der Atemwiderstand spürbar erhöht ist
- Schwindelgefühl oder Schmerzen auftreten
- Reiz-, Geschmacks- oder Geruchserscheinungen auftreten
- das Filtergerät beschädigt ist

### Stellen Sie sicher, dass . . .

- das Filtergerät optimal passt und richtig angelegt ist
- Sie einen Kombinationsfilter einsetzen, wenn gasförmige und partikelförmige Schadstoffe auftreten (können)

## 7. Wie lange hält ein Filter?

Wie lange ein Filter hält, hängt von seiner Filterklasse und den Umgebungsbedingungen ab. Einflussfaktoren auf die Gebrauchsdauer sind:

- Konzentration der Schadstoffe in der Umgebungsluft
- Zusammensetzung der Schadstoffe

### Einflussfaktoren auf die Gebrauchsdauer sind:

- Konzentration der Schadstoffe in der Umgebungsluft
- Zusammensetzung der Schadstoffe
- Luftfeuchtigkeit

Temperatur

Luftverbrauch des Nutzers

Da die Gebrauchsdauer von vielen Faktoren beeinflusst wird, ist es nicht möglich, eine geschätzte Gebrauchsdauer anzugeben.

Lokale oder firmeninterne Vorschriften sind zu beachten.

### Das Gebrauchsende eines Filters erkennen Sie daran, dass . . .

- bei Gasfiltern ein spürbarer Geschmack / Geruch auftritt
- bei Partikelfiltern der Atemwiderstand merklich zunimmt
- bei Kombinationsfiltern eines der beiden auftritt

**Tabelle 4: Beispiele von Schadstoffen, ihre Grenzwerte (hier AGW´s gültig für Deutschland) und Filterempfehlungen.**

Dies ist nur eine kleine Auswahl von Schadstoffen als Beispiel. Für weitere Informationen und eine größere Auswahl an Schadstoffen, besuchen Sie bitte unser Filterempfehlungsprogramm Dräger VOICE im Internet ([www.draeger.com/voice](http://www.draeger.com/voice)).

Schadstoffe	Grenzwert / AGW		Filter- typ	Farb- kennung
	ppm	mg/m <sup>3</sup>		
<b>A</b>				
Aceton	500	1200	AX	
Ammoniak	20	14	K	
Asbest	cancerogen (Kat.1)		P3	
<b>B</b>				
Benzol	1	3,2	A	
Blausäure	1,9	2,1	B	
1,3 Butadien	cancerogen (Kat.1)		AX-P3 <sup>12)</sup>	
<b>C</b>				
Chlor	0,5	1,5	B	
Chlorwasserstoff	2	3	E (P2) <sup>11)</sup>	
Cyclohexan	200	700	A	
<b>D</b>				
DDT	-	1	A-P3 <sup>12)</sup>	
Dimethylether	1000	1900	AX	
<b>E</b>				
Essigsäure	10	25	B (P) <sup>11)</sup>	
Ethanol	500	960	A	
<b>F</b>				
Fluorwasserstoff	1	0,83	E (P3) <sup>11)</sup>	
Formaldehyd	0,3	0,37	B2 (P3) <sup>11)</sup>	
<b>G</b>				
Glycerin	-	50	A (P2)	
<b>H</b>				
n-Hexane	50	180	A	
<b>I</b>				
Isooctan	500	2400	A	
<b>P</b>				
Lindan	-	0,1	A-P <sup>12)</sup>	

Schadstoffe	Grenzwert / MAK		Filter- typ	Farb- kennung
	ppm	mg/m <sup>3</sup>		
<b>M</b>				
Methanol	200	270	AX	
Methylisobutylketon	20	83	A	
<b>N</b>				
Nitrose Gase	-	-	NO-P3 <sup>12)</sup>	
<b>O</b>				
Ozon	cancerogen (Kat. 3B)		NO-P3 <sup>12)</sup>	
<b>P</b>				
n-Pentan	1000	3000	AX	
Phosgen	0,02	0,082	B	
<b>Q</b>				
Quecksilber	-	0,1	Hg-P3 <sup>12)</sup>	
<b>S</b>				
Salzsäure, rauchend (37%)	-	-	E-P2 <sup>12)</sup>	
Schwefeldioxid	0,5	1,3	E	
Schwefelwasserstoff	5	7,1	B	
<b>T</b>				
Toluol	50	190	A	
<b>V</b>				
Vinylchlorid	3	7,77	AX	
<b>W</b>				
Wasserstoffperoxid	0,5	0,71	NO-P3 <sup>12)</sup>	
<b>X</b>				
Xylol, alle Isomere	100	440	A	

11) Ein Gasfilter wird gebraucht; falls der Schadstoff auch in Partikelform auftritt oder Partikel vorkommen, wird ein Kombinationsfilter gebraucht, z. B. Formaldehyd: B2 (P3).

12) Ein Kombinationsfilter wird gebraucht, z. B. Lindane: A-P.