

Masterarbeit

# Verwendung von Ersatzrohstoffen aus der Bau- und Umweltwirtschaft als Klinkerrohmateriale

Technische, wirtschaftliche und logistische Lösungsansätze am Beispiel der  
Bernegger Gruppe

**Kurt Bernegger, BSc.**

07.09.2015



Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung  
Department Mineral Resources Engineering  
Montanuniversität Leoben

A-8700 LEOBEN, Franz-Josef-Straße 18  
Tel.Nr.: +43/(0)3842-402-1801  
Fax: +43/(0)3842-402-1802  
[aufbereitung@unileoben.ac.at](mailto:aufbereitung@unileoben.ac.at)

---

## Ehrenwörtliche Erklärung

---

„Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.“

Aus Gründen der leichteren Lesbarkeit wird auf eine geschlechtsspezifische Differenzierung in dieser Arbeit, wie z.B. TeilnehmerInnen, verzichtet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung für beide Geschlechter.

---

## Danksagung

---

An dieser Stelle möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden für die Unterstützung über das gesamte Studium hinweg bedanken. Mein besonderer Dank gilt Anita, vor allem für die verständnisvolle Begleitung in der Endphase meines Studiums.

Des Weiteren gilt mein Dank Herrn Prof. Flachberger für seine Geduld, den Ansporn und die Unterstützung im Hinblick auf die letztendliche Fertigstellung dieser Arbeit.

Abschließend sage ich meinen Studienkollegen danke für unsere tolle gemeinsame Zeit. Allen voran Stefan Kirnbauer für unsere Erlebnisse und seine Unterstützung in so vielen Lebenslagen und das von Leoben bis ans „Ende der Welt“.

---

## Zusammenfassung

---

Die Ergebnisse aus der vorliegenden Arbeit zeigen, dass es theoretisch möglich ist, unter Verwendung eines hohen Anteils an Ersatzrohstoffen ein klinkerähnliches Produkt zu erzeugen, welches in den chemischen Eigenschaften jenen eines Portlandzementklinkers gleicht. Die erreichte Substituierbarkeit von primären Rohstoffen durch Stoffströme aus der Abfallwirtschaft liegt mit etwa 50 % bzw. teilweise sogar bis zu 100 % weit über dem Branchendurchschnitt.

Die Analysen, welche für Abfallströme ohnehin auf Basis gültiger rechtlicher Rahmenbedingungen durchgeführt werden müssen, bilden eine solide Basis für die Vorauswahl der Ersatzrohstoffe. Allerdings ist eine weiterführende Bewertung aufgrund der im Rahmen der gesetzlich zu prüfenden Elemente unmöglich, weil eine ganze Reihe von für die Zementerzeugung als wesentlich zu erachtende Parameter nicht enthalten sind.

Die im Zuge dieser Arbeit gewählte Vorgehensweise betreffend Vorbereitung und zusätzlicher Analysen der Proben schafft auf praktikable Weise eine geeignete Basis, mögliche Rohmehlmischungen zu berechnen und eine Aussage über die Eignung der einzelnen Ersatzrohstoffe zu treffen. Diese Art der Betrachtung ist für erste Abschätzungen der Projektumsetzbarkeit sehr zweckmäßig. Das angewandte Verfahren zur Probenvorbereitung und die darauf folgende Analyse liefern für den aktuellen Planungsstand ausreichend genaue Ergebnisse zur Mischungsberechnung.

Im Hinblick auf die Konzeption einer zukünftigen Aufbereitungsanlage wird aufgrund der Unvorhersehbarkeit in Bezug auf Menge, Zeitpunkt und Chemismus der Eingangsmaterialien, der Flexibilität sowie in weiterer Folge der Qualitätssteuerung schon im Bereich der Materialannahme eine zentrale Rolle beigemessen. Auch der Umgang mit Störelementen und die etwaige Ausschleusung derer werden für den Erfolg einer solchen Aufbereitungsanlage entscheidend sein.

Bezogen auf eine mögliche Umsetzung konnte mit dem Ennshafen ein bestens geeigneter Standort gefunden werden. Dieser bietet sich durch die zentrale Lage für den Eingang der Abfälle zu als auch den Abtransport der Trennprodukte von der Aufbereitungsanlage und die dort bereits vorhandene nutzbare Infrastruktur an.



---

## **Abstract**

---

The thesis at hand demonstrates the theoretical application of a great amount of alternative raw materials to create a product, which in terms of the chemical properties equals Portland cement clinker. The achieved substitution rate of 50 percent and in some cases up to 100 percent is way above the sectoral average.

The available chemical characterizations, which are compulsory due to the legislation regarding waste, lack of essential parameters for clinker raw mix calculations.

This thesis chooses a practical approach to get further data, in order to carry out raw mix calculations. This represents a satisfying approach for the current project status.

Based on the unpredictability of the future alternative raw materials, regarding the amount, the chemical constitution and their time of occurrence, one major goal for the design of the plant should be flexibility. Furthermore the extraction and the discharge of harming elements will represent a key role in term of the process engineering.

According to the findings the available infrastructure at the Ennshafen makes the site a vital choice for a future project realization.

---

# Inhaltsverzeichnis

---

Ehrenwörtliche Erklärung .....	II
Danksagung .....	III
Zusammenfassung .....	IV
Abstract .....	V
Inhaltsverzeichnis .....	VI
1 Einleitung .....	1
1.1 Vorstellung der Bernegger Gruppe.....	1
1.1.1 Firmenstruktur und Tätigkeitsbereiche .....	1
1.1.2 Bernegger – Kompetenz entlang des Wertschöpfungskreislaufes .....	3
2 Aufgabenstellung und Zielsetzung .....	5
3 Der Baustoff Zement .....	7
3.1 Die Zementerzeugung .....	7
3.2 Chemische Zusammensetzung des Portlandzementklinkers .....	8
3.2.1 Die mineralogische Klinkerzusammensetzung .....	11
3.2.2 Der Kalkstandard KSt (= lime saturation factor LSF).....	16
3.2.3 Der Silikatmodul SM (=silica ratio SR).....	16
3.2.4 Der Tonerdmodul TM (= alumina ratio AR) .....	17
3.2.5 Weitere Kennzahlen .....	18
4 Rohstoffauswahl und Mischungsberechnung.....	22
4.1 Beschreibung der „Rohstoffquellen“ .....	22
4.1.1 Kalkkomponente.....	22
4.1.2 Tonkomponente .....	25
4.1.3 „Rohstoffe“ aus der Sparte <i>Umwelt</i> .....	25
4.2 Vorauswahl der Ersatzrohstoffe .....	27
4.3 Probenvorbereitung.....	28
4.4 Auswahl der Ersatzrohstoffe .....	30
4.5 Die Mischungsberechnung – Zwei Herangehensweisen.....	31
4.6 Mathematischer Hintergrund der Mischungsberechnung .....	32
4.7 Ergebnisse der Mischungsberechnung .....	35
4.7.1 Raw Mix 01 und 02.....	35
4.7.2 Raw Mix 03 bis 06 .....	37
4.7.3 Raw Mix 07 und 08.....	39

4.7.4	Raw Mix 09.....	40
4.7.5	Raw Mix 10 bis 13.....	41
4.7.6	Raw Mix 14 bis 16.....	43
4.7.7	Austauschbarkeit von einzelnen Rohstoffkomponenten.....	44
4.8	Validierung der Ergebnisse.....	45
4.8.1	Mögliche Ursachen für die Unschärfe der Ergebnisse.....	47
4.8.2	Vergleich der Analyseverfahren.....	49
4.9	Interpretation der Ergebnisse aus der Mischungsberechnung.....	55
5	Anlagenbau und Verfahrenstechnik.....	57
5.1	Zwischenlager.....	58
5.1.1	Bildung von Rohstoffgruppen.....	59
5.1.2	Lagerung pro Baustelle.....	59
5.1.3	Flexible Kombinationen.....	59
5.2	Online-Materialanalyse.....	60
5.2.1	NIR – Nahinfrarot-Spektroskopie.....	60
5.2.2	LIBS – Laserinduzierte Plasmaspektroskopie (Laser-induced breakdown spectroscopy).....	62
5.2.3	Spezielle und maßgefertigte Analysesysteme.....	64
5.2.4	PGNAA – Prompt Gamma Neutron Activation analysis (Cross Belt Analyzer) 65	
5.3	Software zur Mischungsberechnung.....	69
5.4	Der Bypass.....	71
6	Finanzielle Betrachtung – Standortwahl.....	74
6.1	Transportkosten Rohstoff.....	75
6.2	Transportkosten Zement.....	77
6.3	Gesamtkosten und Standortwahl.....	77
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	79
8	Literaturverzeichnis.....	81
8.1	Bücher und Zeitschriften.....	81
8.2	Normen, Gesetze und Richtlinien.....	81
8.3	Internetquellen.....	82
8.4	Sonstige Quellen.....	82
9	Abbildungsverzeichnis.....	84
10	Tabellenverzeichnis.....	85
11	Abkürzungsverzeichnis.....	87
	Anhang Inhaltsverzeichnis.....	I

Anhang..... III

---

# 1 Einleitung

---

## 1.1 Vorstellung der Bernegger Gruppe

---

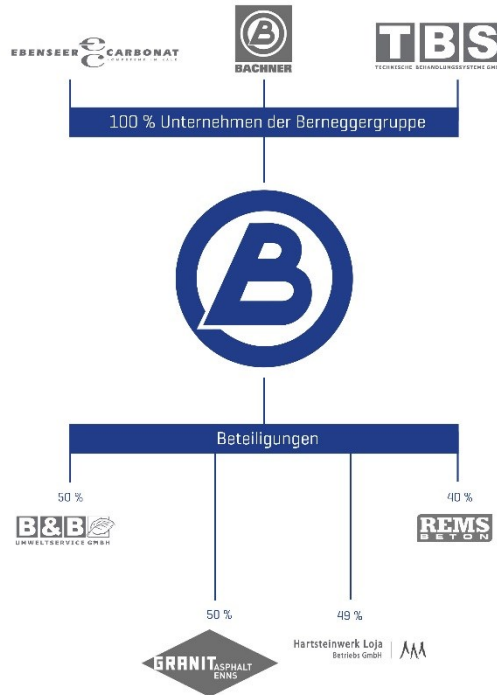
Die Bernegger GmbH mit ihrer Firmenzentrale in Molln (OÖ) und weiteren 17 Standorten ist in den Sparten *Rohstoff*, *Bau* und *Umwelt* tätig. Kunden aus diesen Bereichen schätzen das vielfältige Leistungsangebot, das durch hohe Qualitäts-, Sicherheits- und Umweltschutzstandards besticht. Innovationskraft, Gestaltungswille und Zusammenhalt bilden jene tragfähigen Säulen, auf denen das Familienunternehmen seit nunmehr drei Generationen baut und die Entwicklung von Bernegger zu einem bedeutenden Bau- und Rohstoffunternehmen ermöglichte. Das Unternehmen beschäftigt 650 Mitarbeiter und betreibt einen Fuhrpark von über 1.000 Baumaschinen und LKWs. (vgl. Weilguni o.J.a)

---

### 1.1.1 Firmenstruktur und Tätigkeitsbereiche

---

Die Bernegger Gruppe deckt einen großen Leistungsbereich auf dem Gebiet der Rohstoffindustrie, der Bauwirtschaft sowie der Umwelttechnik ab. Zu den 100%igen Tochterunternehmen der Bernegger GmbH zählen die Ebenseer Carbonat GmbH, welche sich auf die Erzeugung von Futter- und Düngemittel sowie Produkte für die chemische Industrie spezialisiert hat. Zudem die Technische Behandlungssysteme GmbH, welche auf dem Sektor der Umwelttechnik als international anerkannter Vorreiter bei der Aufbereitung der Schredderleichtfraktion gilt. Ein weiteres 100%iges Mitglied in der Bernegger Gruppe ist die Bachner Brunnen- und Spezialtiefbau GmbH, welche in allen Bereichen der modernen Brunnenbau- und Bohrtechnik erfolgreich tätig ist. Zum Leistungsangebot zählen unter anderem die Errichtung von Brunnen, die Durchführung von Pumpversuchen, die Herstellung von Energiesäulen (Nutzung der geothermischen Energie), die Baugrubensicherung oder die Herstellung von Bohrpfählen. Damit vervollständigt die Firma Bachner den Kompetenzbereich der Bernegger GmbH auf dem Sektor des Spezialtiefbaus und erweitert die Leistungen in der Umwelttechnik.



**Abbildung 1: Firmenstruktur der Bernegger GmbH (Quelle: Weilguni o.J.b)**

Die Hartsteinwerk Loja Betriebs GmbH ist eine Betriebsgesellschaft zwischen der Bernegger GmbH und dem Habsburg-Lothringenschen Gut Persenbeug. Im Hartsteinwerk Loja wird Kersantit und Granitporphyr abgebaut und in der Aufbereitungsanlage veredelt. Das Hartgestein mit den hervorragenden Eigenschaften aus dem Lojasteinbruch findet überall dort Anwendung, wo hohe Anforderungen an die Bauwerke gestellt werden. So beispielsweise als Gleisschotter für den Eisenbahnbau oder als Zuschlagsstoff für besonders beanspruchte Asphalt- und Betonprodukte.

Die Bernegger GmbH hält weiters Beteiligungen an verschiedensten Unternehmen. Die B&B Umweltservice GmbH beschäftigt sich mit der Logistik rundum die Haus- und Gewerbemüllentsorgung. Die Granit Asphaltwerk Enns GmbH verarbeitet betriebseigene Rohstoffe am Standort Enns zu Asphaltmischgut. Mit der Rems Beton erreicht Bernegger eine regionale Erweiterung im Bereich der Produktion und des Vertriebs von Transportbeton.

### 1.1.2 Bernegger – Kompetenz entlang des Wertschöpfungskreislaufes

Die Gewinnung und Aufbereitung qualitativ hochwertiger Baurohstoffe, der Einsatz ebendieser in der Bauwirtschaft und die stoffliche Verwertung von Reststoffen unserer Wohlstandsgesellschaft bilden jene drei Sparten, in welcher die Bernegger GmbH tätig ist. In jeder Sparte werden Stoffe primären oder sekundären Ursprungs gewonnen, aufbereitet, weiterverarbeitet oder recycelt, welche entweder in derselben oder der darauffolgenden Sparte Verwendung finden (siehe Abbildung 2). (vgl. Weilguni o.J.c)



**Abbildung 2: Die Kompetenzen der Bernegger Gruppe entlang des Wertschöpfungskreislaufes (Quelle: Weilguni o.J.c)**

### **Sparte *Rohstoff***

Die Gewinnung, Aufbereitung und Veredlung von Rohstoffen am Beginn des Rohstoffkreislaufs zählt zu den Kernkompetenzen der Bernegger GmbH. Es wird Kalk-, Dolomit- und Hartgesteinsbergbau ausgeübt sowie Kies- und Schotterwerke betrieben. Die bergmännisch gewonnenen Rohgutarten werden zu qualitativ hochwertigen primären Rohstoffprodukten für unterschiedlichste Anwendungszwecke verarbeitet. Zu den Anwendungsbereichen zählen die Bau-, Glas- und Futtermittelindustrie sowie die chemische Industrie und auch die Landwirtschaft. Eines der wesentlichsten Anwendungsgebiete der Rohstoffe ist unter anderem die Erzeugung von Transportbeton. (vgl. Weilguni o.J.d)

### **Sparte *Bau***

In der Sparte *Bau* liegen die Schwerpunkte auf dem Tief- und Spezialtiefbau, dem Straßen- und Sonderstraßenbau, der Hangsicherung, dem Hochwasserschutz, dem Kraftwerksbau sowie Abbruch und Demontagen. Zu den jährlich rund 400 Projekten zählen u.a. bedeutende Bauvorhaben für Energieversorger, öffentliche Institutionen, bekannte österreichische Unternehmen und viele mehr. (vgl. Weilguni o.J.e)

Um das Angebot für die Bauwirtschaft zu vervollständigen, runden Sprengungen, der Verleih von Baumaschinen sowie die Durchführung von Transporten und Schwertransporten die Palette ab. (vgl. Weilguni o.J.e)

### **Sparte *Umwelt***

Mit der dritten Sparte *Umwelt* werden jene Tätigkeiten abgedeckt, welche sich mit der fachgerechten und gesetzeskonformen Entsorgung und Verwertung all jener Abfälle befassen, die aus dem Wertschöpfungskreislauf stammen. Zu den Leistungen im Bereich Abfallwirtschaft zählt das Recycling jener rückgebauten Baustoffe, die in einem Recyclingprozess zu wieder verwendbaren Sekundär-Rohstoffen verarbeitet werden können. Durch den Einsatz solcher in Recyclingverfahren gewonnenen Sekundär-Rohstoffe reduziert sich der Bedarf an aus der Natur stammenden Primär-Rohstoffen, was wiederum die nachhaltige Absicherung der Lagerstättenreserven fördert. Weiters werden Deponien betrieben, auf denen Abfälle, die nicht verwertet werden können, fachgerecht eingelagert werden. (vgl. Weilguni o.J.f)



---

## 2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

---

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird das Ziel verfolgt, unter ausschließlicher oder zumindest einer höchstmöglichen Verwendung von Ersatzrohstoffen aus der Sparte *Umwelt* ein klinkerähnliches Produkt in einer thermischen Reststoffverwertungsanlage (TRVA) herzustellen, welches in seinen chemischen und physikalischen Eigenschaften jenen eines Portlandzementklinkers gleicht. Dies hätte zwei wirtschaftliche Vorteile. Auf der einen Seite würde wertvolles Deponievolumen eingespart und Lagerstättenvolumen geschont werden und stellt dies damit in zweierlei Hinsicht einen ressourcenschonenden Umgang mit der Umwelt dar. Auf der anderen Seite könnte kostengünstiger Zement, vorwiegend für den Eigenverbrauch, erzeugt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden vorerst nur die chemischen Voraussetzungen der Ersatzrohstoffe untersucht, welche für die Klinkererzeugung relevant sind, um festzustellen, ob sich vom Chemismus der Ersatzrohstoffe theoretisch überhaupt ein Klinker erzeugen lässt. Vorerst werden Betrachtungen hinsichtlich der mechanischen Anforderungen wie der Druckfestigkeit (Norm- und Anfangsfestigkeit) bzw. Betrachtungen der physikalischen Anforderungen hinsichtlich Erstarrungsbeginn, Raumbeständigkeit oder Hydrationswärme bis auf weiteres außer Acht gelassen.

Ferner stehen Abfälle aus der Sparte *Umwelt* zur Verfügung, welche sich aufgrund ihrer Heizwerte (vergleichbar mit Kohle) durchaus als Ersatzbrennstoffe eignen würden. Bei Projektumsetzung wird aller Voraussicht nach auf diese Ersatzbrennstoffe zurückgegriffen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde jedoch auf die Verwendung von Alternativbrennstoffen sowie deren Auswirkung auf die Klinkerqualität vollständig verzichtet. Dass die Verbrennungsrückstände Auswirkungen auf die Klinkerzusammensetzung haben, steht allerdings außer Frage.

Dennoch ist aus heutiger Sicht bereits gewiss, dass, sollte dieses Projekt realisiert werden, die höchsten Standards für Abwärmenutzung, Ersatzbrennstoffverwendung etc. zum Einsatz kommen. Des Weiteren wird die Abgasreinigung nach dem Vorbild einer modernen, leistungsfähigen Abfallverbrennungsanlage konzipiert. Diese Tatsache sowie deren rechtliche Würdigung werden jedoch in dieser Arbeit nicht näher erläutert.

Der Hauptteil der Arbeit umfasst die Evaluierung der zur Verfügung stehenden Ersatzrohstoffe. Trotz umfangreicher gesetzlich verpflichtender Analysen und Gutachten für Abfälle aus der Sparte Umwelt fehlen für die Zementherstellung wichtige Parameter, ohne denen sich keine Berechnungen der Klinkerrohmehlmischungen durchführen lassen. Sofern erforderlich, sollen - als Grundlage für sämtliche weiterführende Überlegungen und darauf folgende Berechnungen - infrage kommende Ersatzrohstoffe ausgehoben, vorbereitet, analysiert und interpretiert werden,

Darauf aufbauend soll in Anlehnung an die gewonnenen Erkenntnisse ein kurzer Überblick über die daraus resultierende Konzeption der Anlage gegeben werden. Diese beschränken sich auf den Umgang mit den Materialien am Beginn des Prozesses. Besonderes Augenmerk soll auf die Einrichtungen zur Materialannahme und zur Zwischenlagerung sowie die dafür notwendige Messtechnik gelegt werden. Am Ende zielt diese Arbeit noch auf die Beantwortung der Frage eines wirtschaftlich günstigen Standortes ab.

---

### 3 Der Baustoff Zement

---

*„Zement ist ein anorganischer, nichtmetallischer, feingemahlener Stoff, der nach dem Anrühren mit Wasser infolge chemischer Reaktionen mit dem Anmachwasser (Hydratation) selbstständig erstarrt und erhärtet; er bleibt nach dem Erhärten auch unter Wasser fest und raumbeständig.“ (o.A., 2011a)*

*„Portlandzementklinker wird durch Sinterung einer genau festgelegten Rohstoffmischung (Rohmehl, feuchte Rohmasse oder Rohschlamm) hergestellt. Diese enthält Elemente, die gewöhnlich als Oxide ausgedrückt werden –  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  –, sowie geringe Mengen anderer Stoffe. Rohmehl, feuchte Rohmasse oder Rohschlamm werden fein aufgeteilt und innig gemischt und sind dadurch homogen.*

*Portlandzementklinker ist ein hydraulisches Material, das nach Massenanteilen zu mindestens zwei Dritteln aus Calciumsilicaten ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  und  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) bestehen muss. Der Rest besteht aus Aluminium und Eisen enthaltenden Klinkerphasen und anderen Verbindungen. Das Massenverhältnis  $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2)$  muss mindestens 2,0 betragen. Der Massenanteil an Magnesiumoxid ( $\text{MgO}$ ) darf 5,0% nicht überschreiten.“ (ÖNORM EN 197-1:2001, S. 10)*

Folgende Unterkapitel widmen sich der Zementerzeugung sowie den dafür notwendigen Kennwerten, um eine Basis für die darauffolgenden Kapitel zu schaffen.

---

#### 3.1 Die Zementerzeugung

---

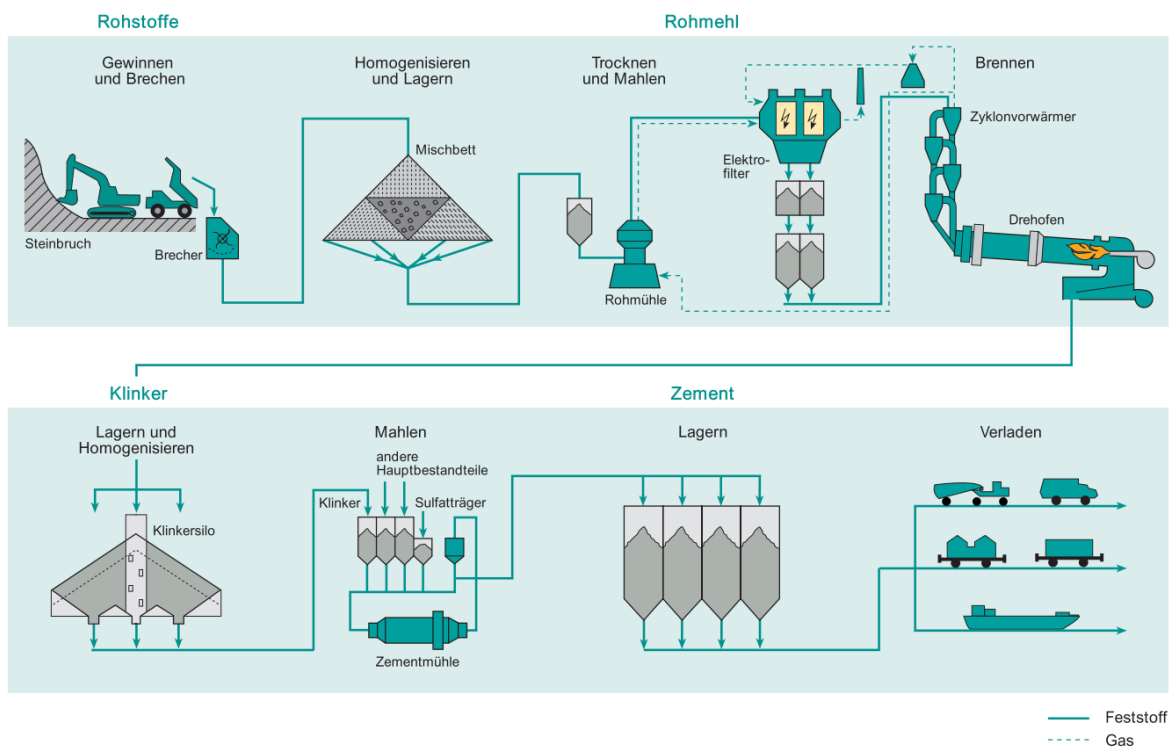
*„Zement wird heute in modernen Zementwerken in einem kontinuierlichen Prozess aus den natürlichen Rohstoffen Kalkstein und Ton bzw. Mergel (Mengenverhältnis ca. 2:1) erzeugt. Bei Bedarf werden Quarzsande und eisenoxidhaltige Stoffe als Korrekturmaterialien (für die bessere Sinterung) zugegeben.“ (o.A., 2011b)*

*„Die Rohstoffe werden gemeinsam zu Rohmehl vermahlen und dann in einem Drehrohrofen bei Temperaturen von ca. 1.450 °C zum so genannten Klinker gebrannt (Sinterungs-Prozess). Die Drehbewegung des schräg gelagerten*

Ofens bringt das Material in eine kugelige Form (Granalien). Durch eine rasche Abkühlung auf eine Temperatur von unter 200 °C bleiben die hydraulischen Eigenschaften des Klinkers erhalten.“ (o.A., 2011b)

„Die Klinkergranalien werden zusammen mit Hüttensand, Flugasche, Kalkstein und Gips in Walzen- und Kugelmühlen zum fertigen Produkt, dem Zement, vermahlen. Art und Menge der einzelnen Bestandteile und die Mahlfeinheit des Zements beeinflussen die physikalischen und zementtechnologischen Eigenschaften des Endprodukts.“ (o.A., 2011b)

Die untenstehende Abbildung veranschaulicht den oben beschriebenen Produktionsprozess von Zement schematisch.

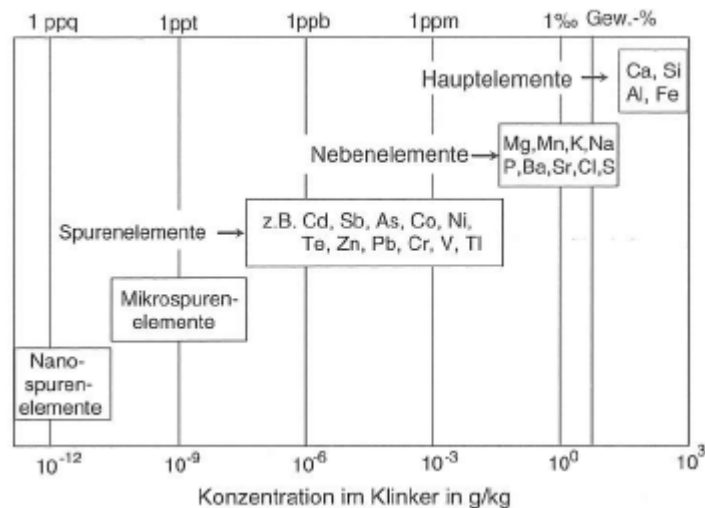


**Abbildung 3: Schematische Darstellung des Zementherstellungsprozesses vom Steinbruch bis zum Versand (Quelle: Basten 2002, S. 18)**

### 3.2 Chemische Zusammensetzung des Portlandzementklinkers

Portlandzementklinker (PZ) sind die Basis hydraulischer Bindemittel und sind wesentlich für die Festigkeitsbildung. (vgl. Stark und Wicht 2000, S. 4)

Die Bestandteile des PZ-Klinkers mit ihrem üblichen Schwankungsbereich sind in der nachfolgenden Abbildung 4 in drei Bereichen entsprechend ihrer Massenanteile im Klinker zusammengestellt. (vgl. Stark und Wicht 2000, S. 4)



**Abbildung 4: Konzentrationsbereiche von Haupt-, Neben- und Spurenelementen im PZ-Klinker (nach SPRUNG) (Quelle: Stark und Wicht 2000 S. 5)**

Die Hauptbestandteile sind Ausgangsbasis der Rohmischungsherstellung; ihre chemischen Kennwerte werden zur Modulberechnung (chemische Zusammensetzung) und Phasenberechnung (mineralogische Zusammensetzung) herangezogen. (vgl. Stark und Wicht 2000, S. 4)

*„Für die Nebenbestandteile gilt gemeinsam, dass [sic!] für bestimmte Eigenschaften des PZ-Klinkers einzelne Bestandteile ausgehalten oder im Masseanteil begrenzt sein müssen (z.B. Sulfate oder Alkalien).“ (Stark und Wicht 2000, S. 4)*

*„Die Spurenelemente verändern die Eigenschaften des Klinkers nur geringfügig, spielen aber im technischen Herstellungsprozess [sic!] durch Umweltbelastung hinsichtlich Stoffanreicherung und ihrer umweltgerechten Entsorgung eine Rolle. Als Schwermetalle können sie, wie z.B. im Fall von Chrom, bezüglich der Gesundheitsgefährdung des Menschen bedeutungsvoll sein.“ (Stark und Wicht 2000, S. 4)*

*„Die chemische Zusammensetzung des PZ-Klinkers kann beträchtlich schwanken. Sie wird maßgeblich von der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung der verwendeten Roh- und Brennstoffe sowie dem Brenn- und Kühlregime bei der Klinkerherstellung beeinflusst [sic!].“ (Stark und Wicht 2000, S. 5)*

Die durchschnittliche Schwankungsbreite der chemischen Zusammensetzung des Portlandzementklinkers ist in der nachfolgenden Tabelle 1 dargestellt.

Oxid	Min [%]	Max [%]	Mittel [%]
CaO	60,0	69,0	64,5
SiO <sub>2</sub>	20,0	25,0	22,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,0	7,0	5,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2	5,0	2,6
MgO	0,5	5,0	2,8
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	0,5	1,5	1,0
SO <sub>3</sub>	0,1	1,3	0,7

**Tabelle 1: Durchschnittliche Schwankungsbreite der chemischen Zusammensetzung von PZ-Klinker (Quelle: vgl. Stark und Wicht 2000, S. 5)**

Laut Rücksprache mit einem Fachmann aus dem Bereich der Zementtechnologie sind neben den Anforderungen an die 27 Normzementarten lt. ÖNORM EN 197-1:2001 (die in der Tabelle in Anhang 1 zu finden sind) folgende Grenzwerte zu beachten und einzuhalten:

Oxid / Element	Toleranzbereich / Grenzwert		Anmerkung	Quelle
KSt	94 %	98 %		Freimann 2014
SM	2,35 %	2,75 %		Freimann 2004
TM	1,4 %	1,8 %		Freimann 2014
MgO	< 2,0 % < 5,0 %		Darüber qualitative Einbußen Muss darunter liegen	Freimann 2014 ÖNORM EN 197-1
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			gutes Oxid; Substitution Fe ↔ Mn	Locher, F.W. S. 86
TiO <sub>2</sub>			gutes Oxid; Substitution Al ↔ Ti	Locher, F.W. S. 86
K <sub>2</sub> O	< 2,0 %		schlecht; flüchtig, sammeln sich im Prozesskreislauf an und verschließen den Ablauf	Freimann 2014
Na <sub>2</sub> O	< 1,0 %		schlecht; weniger flüchtig, sammeln sich im Prozesskreislauf an und verschließen den Ablauf	Freimann 2014
SO <sub>3</sub>	< 5,0 % <3,5%			Freimann 2004 ÖNORM EN 197-1

P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	< 1,0 %			Freimann 2014
Cl	< 0,1 %			ÖNORM EN 197-1
Hg			Flüchtig, Emissionsgrenzen	Freimann 2014
F				Freimann 2014
As	< 1,0 %		Begleitet Schwefel	Freimann 2014
CrO <sub>3</sub>	<0,01%		Mauerkrätze	Freimann 2014
LiO <sub>2</sub>	<1,0%		Ab 0,1% kann es zu Qualitätsreduktionen kommen	Freimann 2014

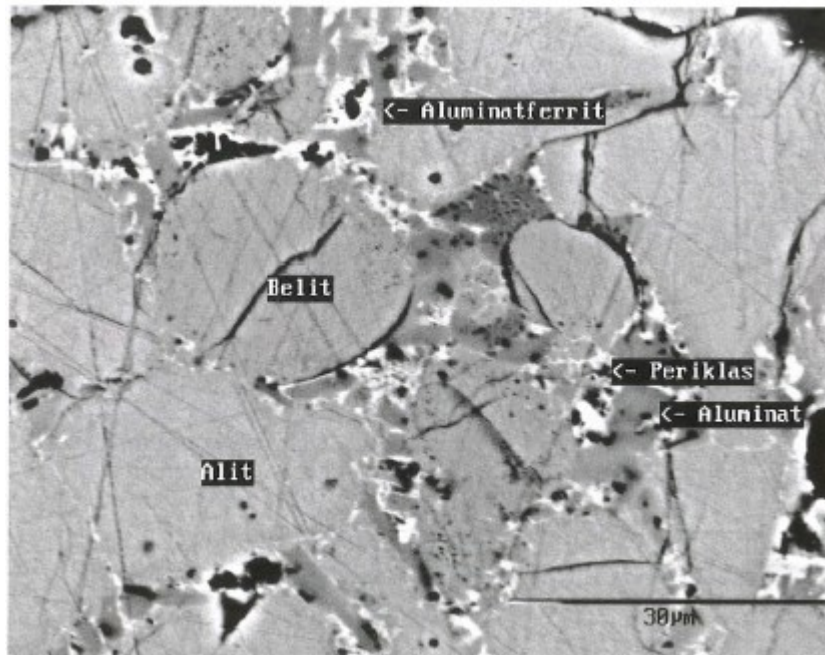
**Tabelle 2: Chemische Anforderungen an den Portlandzementklinker**

### 3.2.1 Die mineralogische Klinkerzusammensetzung

Der Zementklinker besteht im Wesentlichen aus folgenden vier Mineralphasen, welche sich aus den oxydischen Hauptbestandteilen des Klinkers CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> zusammensetzen: (vgl. Stark und Wicht 2000, S. 7)

Bezeichnung des reinen Minerals	Formel	Abkürzung	Bezeichnung des im Klinker vorliegenden Minerals	Klinkermineralgehalt im Portlandzementklinker
Tricalciumsilicat	3CaO·SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	Alit	40 – 80%
Dicalciumsilikat	2CaO·SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	Belit	2 – 30%
Tricalciumaluminat	3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	Aluminat	3 – 15%
Calciumaluminatferrit	4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>2</sub> (A,F)	Aluminatferrit	4 – 15%

**Tabelle 3: Die Hauptklinkerphasen (vgl. Stark und Wicht 2000, S. 7f)**



**Abbildung 5: Rückstreuelektronenbild eines ungeätzten Portlandzementklinker-Anschliffs  
(Quelle: Stark und Wicht 2000, S. 8)**

*„Die Gesamtwirkung aller 4 Klinkerphasen im technischen Erhärtungsprozess [sic!] bestimmt die anwendungstechnischen Eigenschaften, vorrangig die hydraulische Aktivität des Klinkers. Alit dominiert dabei als wichtigster Klinkerbestandteil. Er ist Träger des Festigkeitspotentials und bestimmt das Niveau der Anfangs- und Endfestigkeit.“ (Stark und Wicht 2000, S. 9)*

Der Zementklinker besteht im Wesentlichen aus Tricalciumsilikat ( $C_3S$  – Alit), Dicalciumsilikat ( $C_2S$  – Belit), Tricalciumaluminat ( $C_3A$  – Aluminat) und Calciumaluminatferrit ( $C_2(A,F)$  – Aluminatferrit), welcher aus einer Rohmehlmischung mit den Hauptkomponenten Calciumoxid  $CaO$ , Siliziumdioxid  $SiO_2$ , Aluminiumoxid  $Al_2O_3$  und Eisenoxid  $Fe_2O_3$  in einem bestimmten Mischungsverhältnis erzeugt wird. Diese Rohmehlmischung wird gesintert, wodurch sich die sogenannten Klinkerphasen ausbilden. (vgl. Locher 2006, S. 32)

Unter Sintern versteht man das Erhitzen von feinkörnigem Material, wobei die Temperatur unterhalb der Schmelztemperatur der Hauptkomponenten bleibt. Die Gestalt des Materials bleibt erhalten, wobei es zum Schwinden kommen kann.



*„Für die Erhärtung des Zements ist die Hydratation der Calciumsilikate Alit (Tricalciumsilikat  $C_3S$ ) und Belit (Dicalciumsilikat  $C_2S$ ) von überragender Bedeutung. Sie sind die festigkeitsgebenden Phasen. Die entstehenden Calciumsilicathydrate enthalten im Wesentlichen  $CaO$ ,  $SiO_2$  und Wasser. Ihre spezifische Zusammensetzung hängt vor allem vom w/z-Wert ab.“*  
(Benedix 2014, S. 157)

*„Alit ist aufgrund seiner hohen Reaktionsfähigkeit für die Frühfestigkeit des Zements verantwortlich. Belit ist wesentlich reaktionsträger, erreicht bei langen Hydrationsdauern jedoch die gleiche Druckfestigkeit wie  $C_3S$ . Die Aluminat- und die Ferratphase tragen zur Festigkeitsentwicklung nur wenig bei.“* (Benedix 2014, S. 162)

Die Aluminatphase in Verbindung mit den Silikaten erhöht die Frühfestigkeit des Zements. (vgl. Locher 2006, S. 37)

Die Klinkerzusammensetzung lässt sich auf mehrere Arten bestimmen. Einerseits besteht die Möglichkeit der Mikroskopie, welche die Beschaffenheit, den Gehalt, die Ausbildung und die Verteilung der Klinkerkomponenten beschreibt. Untersucht wird dabei ein geätzter oder ungeätzter Anschliff eines Zementklinkers. Andererseits besteht die Möglichkeit der Röntgendiffraktometrie, bei welcher die einzelnen Klinkerphasen identifiziert sowie die Quantität der einzelnen kristallinen Phasen in einem gemahlene Klinker gemessen werden können. (vgl. Locher 2006, S. 81-84) Eine weitere Möglichkeit, die Klinkerzusammensetzung zu bestimmen, ist die rechnerische Ermittlung nach R.H. Bogue. Dabei wird anhand der chemischen Analyse des Klinkers die mineralogische Klinkerzusammensetzung berechnet bzw. abgeschätzt. Die Berechnung erfolgt anhand von Formeln, welche auf Basis der Ergebnisse aus der chemischen Analyse (Gehalt der einzelnen Oxide im Klinker) gewählt werden. Durch Anwendung der Formeln werden die Oxide  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  und  $Fe_2O_3$  auf die vier Hauptklinkerphasen rechnerisch aufgeteilt. (vgl. Locher 2006, S. 84f)

Die Berechnung der möglichen Klinkerzusammensetzung nach Bogue beschreibt zwar die Mineralogie des Klinkers, gibt jedoch beispielsweise wenig Auskunft, ob im Klinker ein Mangel oder Überschuss an  $CaO$  besteht. In der Praxis bedient man sich daher Moduli, um sowohl die Rohmaterial- als auch die Klinkerzusammensetzung zu charakterisieren. (vgl. Locher 2006, S. 86)

„Für die Ermittlung der chemischen Zusammensetzung des Klinkers im Rahmen einer Rohstoffmischungsberechnung werden Moduln und Kalkbindeformeln angewendet.“ (Stark und Wicht 2000, S. 5)

In Tabelle 4 sind die wichtigsten Formeln einiger Module und Kalkbindeformeln zusammengestellt.

Bezeichnung	Abkürzung	Formel	Üblicher Bereich für PZ
Kalkstandard I	KSt I (LSF)	$\text{KSt I} = \frac{100 \text{ CaO}}{2,8\text{SiO}_2 + 1,1 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,7 \text{ Fe}_2\text{O}_3}$	92 - 102
Kalkstandard II	KSt II	$\text{KSt II} = \frac{100 \text{ CaO}}{2,8\text{SiO}_2 + 1,18 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \text{ Fe}_2\text{O}_3}$	
Kalkstandard III (für MgO ≤2,0%)	KSt III	$\text{KSt III} = \frac{100 (\text{CaO} + 0,75\text{MgO})}{2,8\text{SiO}_2 + 1,18 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \text{ Fe}_2\text{O}_3}$	90 - 102
Kalkstandard III (für MgO ≥2,0%)	KSt III	$\text{KSt III} = \frac{100 (\text{CaO} + 1,50\text{MgO})}{2,8\text{SiO}_2 + 1,18 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \text{ Fe}_2\text{O}_3}$	90 - 102
Silikatmodul	SM (SR)	$\text{SM} = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$	1,8 - 3,4
Tonerdemodul	TM (AR)	$\text{TM} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$	1,8 – 2,8

Anmerkung: KSt III berücksichtigt, dass bis zu 2,0% im Klinker gebunden werden können. Dabei ersetzt 1 Teil MgO 0,75 Teile CaO

**Tabelle 4: Übersicht über die wichtigsten Kalkstandards und Module  
(Quelle: vgl. Stark und Wicht 2000 S. 6)**

Anhand der chemischen Zusammensetzung einzelner Rohstoffe und unter Anwendung der in Tabelle 4 angeführten Formeln lassen sich unter Variation der Mengenanteile der einzelnen Rohstoffe zuvor festgelegte Zielwerte der Module erreichen.

Die Zielwerte der einzelnen Module sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst. Neben den in der vorhandenen Literatur gefundenen Werten wurde besonders auf Erkenntnisse und Erfahrungswerte von Experten aus der

Zementindustrie zurückgegriffen. Die orange hinterlegten Werte wurden zur Mischungsberechnung in der vorliegenden Arbeit herangezogen.

Modul	Bereich	Anmerkung	Quelle
KSt II	94 – 98	High quality klinker	Freimann 2014
KSt	90 – 97	Klinker für normalen PZ	Stark und Wicht 2000 S. 6
KSt	97 – 102	Klinker für schnellhärtenden, hochfesten PZ	Stark und Wicht 2000 S. 6
SM	2,35 – 2,75	Good klinker	Freimann 2014
SM	=2	Klinker für normalen PZ	Stark und Wicht 2000 S. 6
SM	>3	Klinker für SiO <sub>2</sub> -reiche PZ	Stark und Wicht 2000 S. 6
SM	<1,8	Klinker für SiO <sub>2</sub> -arme PZ	Stark und Wicht 2000 S. 6
TM	1,4 – 1,8	generell	Freimann 2014
TM	=2	Klinker für normale PZ	Stark und Wicht 2000 S. 6
TM	>4	Klinker für Aluminatzement	Stark und Wicht 2000 S. 6
TM	<1,5	Klinker für sulfatbeständigen PZ	Stark und Wicht 2000 S. 6

**Tabelle 5: Zusammenfassung der Zielwerte der einzelnen Module**

In erster Linie wurde versucht, die Zielwerte für die einzelnen Mischungsberechnungen so zu wählen, dass die erreichten Module innerhalb der Bereiche nach Freimann 2014 liegen. War keine Mischungsberechnung unter Erreichung des Zielwertebereichs möglich, so wurde versucht, zumindest innerhalb der festgelegten Ober- und Untergrenze zu liegen, welche in Anlehnung an andere Quellen vom Verfasser festgelegt wurden. Die festgelegten Werte können aus der folgenden Tabelle entnommen werden:

Modul	Untere Grenze	Zielbereich		Obere Grenze
KSt II	90	94	98	100
SM	2	2,35	2,75	3
TM		1,4	1,8	2

**Tabelle 6: Gewählte Zielwerte im Rahmen der vorliegenden Arbeit**

---

### 3.2.2 Der Kalkstandard KSt (= lime saturation factor LSF)

---

Der Kalkstandard gibt das Verhältnis des tatsächlich vorhandenen CaO-Gehalts zu jenem des maximal bindbaren CaO-Gehalts in der Rohgutmischung wieder, also jenen Anteil in Gew%, welcher mit SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> unter industriellen Brenn- und Kühlbedingungen höchstens gebunden werden kann. (vgl. Locher 2006, S. 86)

$$LFS = \frac{CaO}{CaO_{max}} [\%]$$

**Formel 1: Der Kalkstandard (Quelle: Locher 2006, S. 86)**

Ein Kalkstandard >100% bedeutet, dass ein Überschuss an CaO besteht und damit keine vollständige Reaktion abläuft. In Folge bildet sich Freikalk (ungelöschter Kalk) (vgl. Locher 2006, S. 87)

*„Im Klinker ist der Freikalkgehalt auf < 2 % zu begrenzen, damit der daraus hergestellte Zement raumbeständig ist und um das schädliche Kalktreiben (1,9-fache Volumenvergrößerung) zu verhindern.“* (Thienel 2008, S.36)

Es existieren mehrere Formeln, den Kalkstandard zu berechnen. Die beiden Moduli KSt I und KSt II basieren auf einem CaO-Limit, welches sich aus dem Gleichgewichtszustand im quaternären System CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> ableiten lassen. Der Kalkstandard III berücksichtigt, dass Magnesiumoxid MgO das CaO in einem gewissen Ausmaß ersetzen kann. (vgl. Locher 2006, S. 87)

---

### 3.2.3 Der Silikatmodul SM (=silica ratio SR)

---

Der Silikatmodul beschreibt das Mengenverhältnis zwischen Siliziumdioxid und der Summe aus Aluminiumoxid und Eisenoxid. (vgl. Locher 2006, S. 88)

$$SR = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} [\%]$$

**Formel 2: Der Silikatmodul (Quelle: Locher 2006, S. 88)**

Der Silikatmodul gibt Auskunft über das Verhältnis zwischen fester und flüssiger Phase in der Sinterzone im Ofen. Bei Sintertemperatur ist das SiO<sub>2</sub> vorwiegend in den festen Phasen C<sub>3</sub>S und C<sub>2</sub>S gebunden, während Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in der Schmelze präsent sind. Dieser Modul liegt im Normalfall zwischen 1,5 und 4, wobei Werte zwischen 2,3 und 2,8 gewünscht und daher angestrebt werden. Darunter ist das Rohgut leichter zu brennen und neigt dazu, Ablagerungen im Ofen zu bilden. (vgl. Locher 2006, S. 88)

---

### 3.2.4 Der Tonerdmodul TM (= alumina ratio AR)

---

Der Tonerdmodul gibt Auskunft über das Massenverhältnis von Aluminiumoxid zu Eisenoxid und damit Aufschluss über das quantitative Verhältnis zwischen Calciumaluminat C<sub>3</sub>A und Calciumaluminoferrat C<sub>3</sub>(A,F) und damit wiederum über die Charakteristik der Klinkerschmelze. (vgl. Locher 2006, S. 88)

$$AR = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} [\%]$$

**Formel 3: Der Tonerdmodul (Quelle: Locher 2006, S. 88)**

Bei Klinker mit normaler Zusammensetzung liegt der Tonerdmodul in der Regel zwischen 1,5 und 4. Bevorzugte Brenncharakteristika werden bei einem Wert zwischen 1,4 und 1,6 erreicht, da in diesem Bereich die Gleichgewichtsbedingungen des dementsprechenden Mehrkomponentensystems erreicht werden und damit das gesamte Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in der Rohgutmischung als Schmelze vorliegt. Das bedeutet, dass die größtmögliche Menge an Schmelze bei geringstmöglicher Temperatur vorliegt. (vgl. Locher 2006, S. 88)

Die Reaktion zwischen SiO<sub>2</sub> und CaO zu C<sub>3</sub>S und C<sub>2</sub>S bzw. ferner die Reaktion von C<sub>2</sub>S und freiem CaO zu C<sub>3</sub>S ist im festen Zustand träge, wird jedoch durch die Anwesenheit einer Schmelze sehr begünstigt. Daher ist das Volumen der erzeugten Schmelze bei tiefen Temperaturen eine wichtige Variable für eine effektive Klinkerherstellung. (vgl. Barry und Glasser 2000, S. 22)

---

### 3.2.5 Weitere Kennzahlen

---

#### Der Glühverlust GV (= loss of ignition LOI)

Der Glühverlust (in %) gibt Aufschluss über den Anteil an organischen Substanzen in einer Probe. Wird eine Probe bei über 500°C geglüht, so reduziert sich das Gewicht der Probe. Dies liegt daran, dass die organischen Bestandteile in der Probe verglühen. Zurück bleibt lediglich der Glührückstand, welcher den anorganischen bzw. mineralischen Anteil in der Probe repräsentiert. Der Glühverlust wird aus dem Verhältnis von Glührückstand zur Gesamtmasse der Probe vor dem Glühen berechnet. (vgl. Lippold 2014)

$$LOI = \frac{\text{Masse des Glührückstands}}{\text{Masse der Ausgangsprobe}} [\%]$$

Formel 4: Der Glühverlust (Quelle: vgl. Lippold 2014)

#### Theoretischer Wärmebedarf

Der theoretische Wärmebedarf lässt sich auf mehrere Arten berechnen, wobei im Rahmen dieser Masterarbeit die Berechnung anhand der Ergebnisse der chemischen Analyse des Klinkers herangezogen wird. Die Werte dieser Berechnung stammen aus einer Reihe von Erfahrungs- bzw. Grundwerten (im Wesentlichen der Reaktionswärme und der spezifischen Wärme), welche in einem Berechnungsbeispiel in Anhang 2 ersichtlich sind. (vgl. Keil 2014, S. 337)

*„Der theoretische Wärmebedarf zum Brennen von Zementklinker aus seinen Rohstoffen bewegt sich zwischen 390 und 440 kcal, also in einem sehr engen Bereich; als Mittelwert kann man 420 kcal je kg Klinker annehmen.“* (Keil 2014, S. 337)

#### Alkalisulfat – Sulfatisierungsgrad SG

*„Ein weiterer Kennwert des Klinkers ist der Sulfatisierungsgrad (SG). Der Zementklinker enthält bis über 2 M% SO<sub>3</sub> (als Sulfat gebunden). Die Sulfate entstehen durch Oxidation der Schwefelverbindungen, die mit den Roh- und Brennstoffen in den Ofen eingetragen werden. Beim Brennen verbindet sich das Sulfat bevorzugt mit den Alkalien. Das Molverhältnis der Alkalien zum*

Sulfat wird als Sulfatisierungsgrad (SG) bezeichnet.“ (Henning und Knöfel und Stephan 2014, S. 106)

$$SG = 77,4 * \frac{g_{SO_3}}{g_{Na_2O} + 0,658 * g_{K_2O}} [\%]$$

**Formel 5: Der Sulfatisierungsgrad**  
(Quelle: vgl. Henning und Knöfel und Stephan 2014, S. 106)

„Er gibt den prozentualen Anteil an, der rechnerisch als Alkalisulfat vorliegt. Ein Sulfatisierungsgrad von 100% bedeutet, dass alle Alkalien des Klinkers vollständig als Sulfat vorliegen. Bei einer Übersulfatisierung (SG > 100%) wird der Schwefel nicht vollständig gebunden und es können sich  $K_2SO_4$ ,  $Na_2SO_4$ ,  $K_2SO_4 \cdot 2CaSO_4$  und /oder  $CaSO_4$  als  $\beta$ -Anhydrit bilden. Liegt der Sulfatisierungsgrad < 100%, so können die überschüssigen Alkalien in die Klinkerphasen eingebaut werden.“ (Henning und Knöfel und Stephan 2014, S. 106)

„Ein unterschiedlicher Alkaligehalt wirkt sich besonders stark auf die Reaktivität des Aluminats aus. Bei einem geringen Einbau von Alkalien (ca. 0,5 M%) wird im Vergleich zum undotierten Aluminat die hydraulische Aktivität erhöht. Bei Alkalidotierungen im Bereich von 1,0 M% wird die hydraulische Reaktivität kaum beeinflusst und bei Dotierungen > 1,5 M% wird die hydraulische Aktivität vermindert.“ (Henning und Knöfel und Stephan 2014, S. 106)

Relevant sind die Alkalisulfate vor allem für die Stoffkreisläufe im Ofenbetrieb, da diese den Ofenbetrieb und die Qualität des Klinkers maßgeblich beeinflussen. Im Bereich hoher Temperaturen verdampfen die Alkalisulfatverbindungen und werden im gasförmigen Zustand in kältere Bereiche (Vorwärmer) transportiert, wo diese wieder kondensieren und mit dem Rohmehl in den Ofen zurücktransportiert werden und dort wieder ganz oder teilweise verdampfen oder dissoziieren. (vgl. Stark und Wicht 2000, S. 50)

Zur Anreicherung und Bildung eines inneren Kreislaufs neigen des weiteren auch flüchtige Elemente wie Chlor, aber auch Schwermetalle wie Thallium, Cadmium und Blei. (vgl. Achternbosch und Bräutigam 2000, S. 24)

*„Wegen der niedrigen Schmelzpunkte der Alkaliverbindungen kommt es zu Klebeerscheinungen mit dem Rohmehl und Klinkerbestandteilen im Brennsystem, die an Querschnittsverengungen, Gasumlenkungen und anderen strömungstechnischen Störstellen besonders im Vorwärmer zu Ansätzen führen können sowie die Fließeigenschaften des Brenngutes verschlechtern. Deshalb führt man häufig einen geringen Teilgasstrom des Drehrohrofenabgases, der hohe Anteile an flüchtigen Bestandteilen enthält, über einen sogenannten Bypass [sic!] ab.“ (Stark und Wicht 2000, S. 50)*

Im Zuge der erstellten Rohmehlmischungen in Kapitel 4.7 wird ersichtlich, dass bei der Verwendung eines großen Anteils von Abfallströmen der Sulfatisierungsgrad (Alkalisulfat) häufig ein Problem darstellen wird. Aus diesem Grund wird die Verfahrenstechnik nach einem Bypass verlangen, um die problematischen Elemente und Verbindungen aus dem Brennprozess auszuschleusen. Für das gegenständliche Vorhaben wird daher ein Bypass unumgänglich sein, weshalb unterschiedliche Bypass-Varianten sowie deren Funktionsweisen in einem eigenen Unterkapitel besprochen werden (siehe Kapitel 5.4).

### **Flüssige Phase im Brennbereich (= Liquide Phase LP)**

Wie bereits unter Punkt 3.2.4 „Der Tonerdmodul TM (= alumina ratio AR)“ erwähnt wurde, benötigt die wichtigste Klinkerphase ( $C_3S$ ) für seine Bildung die Präsenz einer flüssigen Phase. Diese Tatsache erklärt auch, warum die Bildung von  $C_3S$  ausschließlich im Drehrohrofen und nicht bereits im Calzinator erfolgt. Rohmehl, welches theoretisch ausschließlich aus den Oxiden  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  und  $Fe_2O_3$  besteht, würde bei einer Temperatur von  $1.338^\circ C$  zu schmelzen beginnen. Dies ist die sogenannte eutektische Temperatur für das C-S-A-F System.

Industrielle Rohmehlmischungen enthalten jedoch zusätzliche Oxide bzw. „Verunreinigungen“ wie  $MgO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$  und  $SO_3$ , welche in gewisser Konzentration die eutektische Temperatur des Systems herabsetzen. Um die Menge an Schmelze zu berechnen gibt es mehrere Formeln, welche in Abhängigkeit der Temperatur gewählt werden (siehe nachfolgende Formel). (vgl. Mosci 2011, S. 1f)



$$LP = 2,95 * Al_2O_3 + 2,2 * Fe_2O_3 + MgO + K_2O + Na_2O [\%]$$

**Formel 6: Berechnung der flüssigen Phase bei 1.400°C und MgO<2%**  
(Quelle: vgl. Henning und Knöfel und Stephan 2014, S. 106)

Für handelsüblichen Klinker liegt der Wert für die flüssige Phase in der heißesten Zone des Ofens (Brennerzone) zwischen 23 und 29%. Ein höherer Wert kann zu Schäden der Ofenauskleidung führen. (vgl. Mosci 2011, S. 1)

---

## 4 Rohstoffauswahl und Mischungsberechnung

---

Das nachfolgende Kapitel stellt eines der wichtigsten Abschnitte in der vorliegenden Arbeit dar, da hier die Kernfrage beantwortet wird, ob sich unter ausschließlicher Verwendung von Ersatzrohstoffen - oder zumindest unter Verwendung eines überwiegenden Anteils an Sekundärrohstoffen - ein klinkerähnliches Produkt herstellen lässt.

---

### 4.1 Beschreibung der „Rohstoffquellen“

---

Neben den möglichen Kalkkomponenten, für Calciumoxid und der ebenfalls benötigten Tonkomponente, zur Bereitstellung von Kieselsäure, Tonerde und Eisenoxid, beides aus primären Rohstoffquellen, werden in den folgenden Unterpunkten auch alternative Rohstoffquellen aus der Sparte *Umwelt* beschrieben. (vgl. Basten 2002, S. 10)

---

#### 4.1.1 Kalkkomponente

---

Am Standort Molln der Bernegger GmbH wird hochreiner Wettersteinkalk mit einem  $\text{CaCO}_3$ -Gehalt von über 95 % abgebaut. Der Abbau des bergfreien mineralischen Rohstoffs i.S.d. § 3 Abs. 1 Z. 4 MinroG erfolgt obertägig im auf ca. 1.100m üA gelegenen Trichterabbau Pfaffenboden. Der Abbau erfolgt mittels Gewinnungssprengungen als Etagenabbau mit strossenartigem Verhieb. Zudem wird selektiver Abbau betrieben, um auf die Anforderungen der Kunden betreffend Rohstoffqualität eingehen zu können. Der Transport in die im Tal gelegene Aufbereitungsanlage erfolgt mittels Förderbandsystem im 3,5 km langen und durchgehend 15 % geneigten Fördertunnel (Elfitunnel). Durch die notwendige Bremsenergie des Förderbandes (Bandbeladung ca. 60 kg/m) wird Strom erzeugt, sodass der Primärbrecher im Steinbruch energieautark (Metso Lokotrack LT 1620 Prallbrecher, 2x 250kW) betrieben werden kann. Die jährlich abgebaute Menge beträgt rund 600.000 Tonnen. (vgl. Nowotny 2014, S. 12-19)

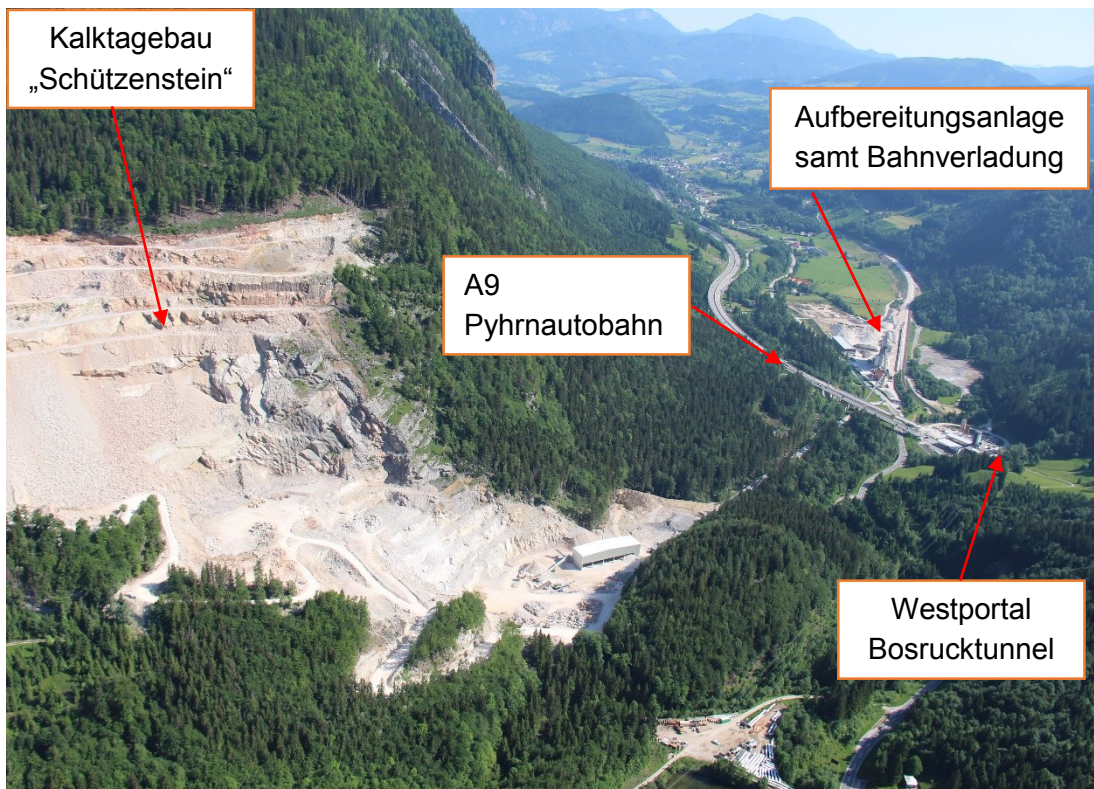


**Abbildung 6: Luftbildaufnahme des Trichterabbaus Pfaffenboden im Jahr 2014**

Vor der Anpassung der Bergbauanlage im Jahr 2014 wurde zur Abförderung des im Steinbruch gewonnenen Kalksteins ein Sturzschaft verwendet, welcher einen Durchmesser von 1,6 m und eine Höhe von 160 m besaß. Aufgrund der knappen Dimensionierung des Sturzschaftes war es zur Vermeidung von Stopfern erforderlich, die Kornfraktion <math><30\text{mm}</math> vor dem Primärbrecher abzusieben. Dieses Material wurde damals zur Gänze auf die Abraumhalde Pfaffenboden abgelagert, welches jedoch als Kalkkomponente zur Klinkererzeugung herangezogen werden könnte. Durch die Anpassung der Bergbauanlage im Jahr 2014 wurde der Sturzschaft durch ein Förderbandsystem inkl. Halle zur Zwischenlagerung ersetzt. Durch die durchdachte Planung der Zwischenlagerhalle wäre es möglich, das Material von der Abraumhalde mittels Radlader oder sonstigem Bergbauzubehör in die Halle zu fördern, über einen Unterflurabzug abzuziehen und über ein Förderband kostengünstig zu Tal zu transportieren.

Eine ähnliche Situation stellt sich am zweiten Kalksteintagebau der Bernegger GmbH in Spital am Pyhrn dar. Dieser Standort wird seit den 1980er Jahren von der Bernegger GmbH betrieben. Abgebaut wird auch hier hochreiner Kalkstein mit

einem  $\text{CaCO}_3$ -Gehalt  $>95\%$  in Form eines Wandabbaus. Die gewonnenen bergfreien mineralischen Rohstoffe werden für die verbrauchernahe Versorgung der öffentlichen, privaten und gewerblichen Auftraggeber als Zuschlagstoff für die Asphalt- und Betonerzeugung, als Rohstoff für die technisch-chemische Industrie (z.B. Trinkwasseraufbereitung, Glasproduktion, Futterkalk, Düngemittel usw.) sowie als qualitätsgesicherte Bauprodukte für den Erd-, Straßen- und Wasserbau (z.B. Hochwasserschutz) eingesetzt. Die Aufbereitung, die Verladung und die Verfuhr des Rohstoffs erfolgt über das hochrangige Straßennetz und sowie ab Mitte 2016 für überregionale Transporte über eine eigene Bahnverladung. (vgl. Apfalter 2015, S. 5)



**Abbildung 7: Luftbildaufnahme des Kalktagebaus "Schützenstein" im Jahr 2015**

In beiden Fällen (Molln und Spital am Pyhrn) würde die Bandbreite des eingesetzten Materials von Restfraktionen aus hochreinem Kalk, über mergeliges Material aus dem Bereich der Vorabsiebung bis hin zu Überlagerungsmaterial aus Verwitterungszonen reichen. Der Einsatz hängt stark von Anfall und anderweitigen Absatzmöglichkeiten ab.



---

### 4.1.2 Tonkomponente

Am Standort Hart der Bernegger GmbH wird Kiesabbau betrieben. Überlagert wird diese Kieslagerstätte von einer 3,20 – 5,00 m mächtigen Lößlehmdecke, welche sich als Aluminiumlieferant in der Zementerzeugung eignen würde (siehe RFA-Auswertung der geglähten Probe – Probennummer 50). (vgl. Enichlmayr 2010, S.15)

Ergänzend sind an anderen Standorten mit Kieslagerstätten ähnliche Verhältnisse anzutreffen.

---

### 4.1.3 „Rohstoffe“ aus der Sparte *Umwelt*

Weitaus interessantere Rohstoffe als Mergel und Kalkstein für die Herstellung einer Rohmehlmischung zur Klinkererzeugung wäre die Verwendung von Reststoffen und Baurestmassen aus dem Bereich der Umwelttechnik, für welche in der Regel keine wirtschaftliche Verwendung oder sinnvolle Verwertungsmöglichkeiten bestehen und welche daher auf Deponien teuer entsorgt werden müssen.

Bereits zum heutigen Tag ist es Stand der Technik, gewisse Ersatzrohstoffe für die Rohmehlerzeugung heranzuziehen.

Gruppe	natürliche Stoffe	Sekundär-Rohstoffe
Ca –	Kalkstein Kreide	Kalkschlämme Abfälle vom Kalkbrennen Calciumfluorid Abfälle vom Steinschneiden Porenbetongranulat
Si –	Sand	Giebereiertsand ölverunreinigte Böden Altsande Sandfangrückstände Sande aus Bodenwaschanlagen Straßenaufbruch Feuerfestausbruch
Fe –	Eisenerz	Kiesabbrand Verunreinigtes Erz Rotschlamm Stahlwerksstäube Walzzunder
Si – Al –	Ton	Bentonit Bleicherde
Si – Al – Fe – Ca –	Mergel	Flugasche Aschen aus der Papierindustrie Rostaschen Schlacken Betonbruch

**Tabelle 7: Eingesetzte Ersatzrohstoffgruppen für die Herstellung von Zementklinker (Quelle: Scur 2013, S. 415)**

Anhand Tabelle 7 ist ersichtlich, dass überwiegend Ersatzrohstoffe aus Produktionsprozessen verwendet werden, welche eine gewisse qualitative sowie quantitative Kontinuität aufweisen.

Darüber hinaus war es Ziel der vorliegenden Arbeit, über die in der Tabelle 7 genannten, eher kontinuierlich anfallenden Stoffströme, vorwiegend projekt- bzw. baustellenbezogene Abfälle in die Mischungsberechnung miteinzubeziehen und damit einer sinnvollen Verwertung zuzuführen.

Grundsätzlich stehen Ersatzrohstoffe aus einer Vielzahl an verschiedenen Baustellen zur Verfügung.

Beispiele von Ersatzrohstoffen, auf welche zurzeit zurückgegriffen werden kann, sind z.B.:

### **Kalkschlamm Ground Unit (Altlast O76 – Kokerei Linz)**

Beim Altstandort O76 „Kokerei Linz“ handelt es sich um das Areal, auf dem sich die Kokerei des Eisen- und Stahlwerkes Linz befindet. Die Kokerei existiert seit dem Jahr 1942 und wurde nach weitgehender Zerstörung im Zweiten Weltkrieg wieder aufgebaut und in Betrieb genommen. Das Areal der Kokerei weist eine Fläche von rund 350.000 m<sup>2</sup> auf. Im Untergrund des Altlastenstandortes liegen, aufgeteilt auf mehrere „Hot Spots“, massive Teerölkontaminationen und Kontaminationen durch aromatische Kohlenwasserstoffe vor (PAK, Benzol, Cyanid). (vgl. Döberl und Müller 2009, S. 1)

Diese kontaminierten Böden wurden bis dato abgetragen und zum Teil in ausländische thermische Verwertungsanlagen, mit dem Ziel der Verwendung als minderwertiger Baustoff, verbracht und zum anderen in externen Aufbereitungsanlagen aufbereitet. Dort wurde die Aufgabe in eine hochkontaminierte Fraktion in Form von Teerrückständen (rd. 10%) und in eine Fraktion mit Reststoffqualität (rd. 90%) getrennt. Zweitere wurde/wird auf einer Reststoffdeponie entsorgt.

Der Regelbetrieb der Ground Unit in Linz besteht jedoch darin, Bodenaushübe (PAK und Cr-belastet) vom Gelände der voestalpine Stahl GmbH aufzubereiten.

### **Altlast N6 – Aluminiumschlackendeponie Wiener Neustadt**

Bei der Altlast N 6 "Aluminiumschlackendeponie" handelt es sich um einen ehemaligen Kiestagebau im Südwesten von Wiener Neustadt, welcher von 1974 bis

etwa 1990 mit Abfällen aufgefüllt wurde. Insgesamt wurden etwa 380.000 m<sup>3</sup> Aluminiumkrätzestäube mit hohen Gehalten an Aluminium und leicht löslichen Salzen, 60.000 m<sup>3</sup> Holzspäne und 41.000 m<sup>3</sup> sonstige Abfälle abgelagert. Das restliche Volumen von etwa 100.000 m<sup>3</sup> nehmen die Deckschichte sowie Zwischenabdeckungen ein, die im Wesentlichen aus Kiesen bestehen. (vgl. Döberl und Weihs 2010, S. 1)

Für diese Altlast liegen umfangreiche Untersuchungsergebnisse vor. Die Sanierung dieser Altlast ist in Planung.

### **Kontaminierter Bodenaushub**

Grundsätzlich fallen über das Jahr eine Vielzahl an verschiedenen kontaminierten Bodenaushüben an. Die Art der Kontamination ist dabei immer abhängig von der vorangegangenen Nutzung der Fläche. Der Großteil der bis dato gesammelten Laborbefunde beinhaltet solche verunreinigten Böden.

Die oben angeführten Materialien stellen keine vollständige Aufzählung dar, sondern sollen exemplarisch einen Eindruck der möglichen Quellen von Ersatzrohstoffen geben und einen Einblick in die Bandbreite vermitteln.

In den folgenden Kapiteln werden die Ersatzrohstoffe, welche durch die Bernegger GmbH abgearbeitet werden, auf deren Nutzbarkeit zur Zementerzeugung untersucht, kategorisiert und zur Klinker-Rohmehlmischungsberechnung herangezogen.

---

## **4.2 Vorauswahl der Ersatzrohstoffe**

Die gewählten Rohstoffe stammten aus verschiedensten Bauvorhaben wie z.B. Gebäudeabbrüchen, Bodenaushüben oder Sanierungen. Das Abbruch- bzw. Aushubmaterial solcher Bauvorhaben wird grundsätzlich immer einer chemischen Analyse unterzogen, um den Verbringungsort der Materialien laut Abfallwirtschaftsgesetz (AWG) bzw. Deponieverordnung (DVO) festzulegen. Damit liegen für die Ersatzrohstoffe bereits Laborbefunde eines externen akkreditierten Prüflabors vor, anhand welcher die Vorauswahl erfolgte.

Die Auswahl der infrage kommenden Proben, aus den in Summe ca. 600 Laborbefunden und Gutachten der letzten drei Jahre, erfolgte aufgrund unterschiedlicher Gesichtspunkte. Einige Ersatzrohstoffe wurden aufgrund ihres Chemismus gewählt, welcher für die Verwendung als Klinkerrohmateriale sprach.

Andere Rohstoffe wurden gewählt, weil sie aus wirtschaftlichen Gründen attraktiv für die Verwertung in der Klinkererzeugung schienen.

Auf Basis der vorhandenen Laborbefunde war jedoch nur eine grobe Vorselektion der infrage kommenden Ersatzrohstoffe möglich, da nicht alle notwendigen Parameter für eine Mischungsberechnung vorhanden waren. So zum Beispiel fehlte bei allen Prüfprotokollen der Siliziumgehalt, welcher jedoch für die Berechnung der einzelnen Module benötigt wird.

Aus diesem Grund mussten die potentiellen Ersatzrohstoffe anhand von Rückstellproben nochmals analysiert werden, um alle notwendigen Kennzahlen zur Rohgutmischungsberechnung zu erhalten.

---

### **4.3 Probenvorbereitung**

Im Rahmen der Bestimmung der Deponieklasse - wie dies für Abfälle, standardmäßig vorgesehen ist - wurden durch das externe Prüflabor für die Bestimmung des Glühverlustes je nach Art der untersuchten Probe und Zweck der Untersuchung verschiedene Normen zur Bestimmung des Glühverlustes angewandt.

So zum Beispiel schreibt die ÖNORM EN 12879 „Charakterisierung von Schlämmen - Bestimmung des Glühverlustes der Trockenmasse“ (Ausgabe 2000-12-01) Punkt 8 „Durchführung“ eine Temperatur von  $550\pm 25^{\circ}\text{C}$  vor. Bei diesen Temperaturen wird zwar das Wasser ausgetrieben und organische Bestandteile verbrannt; es befinden sich aber noch immer sowohl Oxide als auch Carbonate in der Probe.

Aufgrund dieser Unzulänglichkeit wurden von den externen Prüflaboren Rückstellproben der Ersatzrohstoffe aus der Vorauswahl angefordert, welche dann im firmeneigenen Prüflabor erneut analysiert wurden.

Bezugnehmend auf die für Zement gültige Norm - ÖNORM EN 196-2 „Prüfverfahren für Zement Teil 2: Chemische Analyse von Zement“ (Ausgabe 2005-04-01) Punkt 7 „Bestimmung des Glühverlustes“ - wird eine Temperatur von  $950\pm 25^{\circ}\text{C}$  vorgeschrieben. Damit ist garantiert, dass die Carbonate zu annähernd 100% in Oxide umgewandelt werden.

Infolge dessen wurden die Rückstellproben bei Temperaturen bei  $950^{\circ}\text{C}$  geglüht, um einerseits das Wasser auszutreiben, die organischen Anteile in den Proben zu



verbrennen und andererseits die vorhandenen Carbonate (z.B.  $\text{CaCO}_3$ ) vollständig in Oxide (z.B.  $\text{CaO}$ ) umzuwandeln.

Der Gewichtsverlust entspricht daher dem organischen Anteil in der Probe, welcher durch das Glühen verloren gegangen ist plus dem Anteil an  $\text{CO}_2$ , welcher durch den Glühvorgang ausgetrieben wurde (=Glühverlust GV oder LOI). Der Glühverlust kann dazu verwendet werden, die Zusammensetzung der Probe vor dem Glühen zu berechnen.

Die geglühten Proben wurden weiters mit Wachs gemischt (8 g Probe, 2 g Wax) und mittels RFA analysiert. Gemessen wurde mit standardloser Methode Multires-Vac 34 und die Messergebnisse mittels eigener Methode „Pressschmelze“ als Elemente bzw. als Oxide ausgewertet.

Summiert man die einzelnen Gehalte der Oxide und den Glühverlust, so ist festzustellen, dass dieser Wert nicht 100 % ergibt. Dies liegt daran, dass die RFA nicht alle Elemente erkennt bzw. diese nicht zuordnen kann. Erfahrungsgemäß hat die RFA Schwierigkeiten, Elemente, welche leichter sind als Na, zu erkennen.

Grundsätzlich misst die RFA Elemente und gibt diese als vordefinierte Verbindungen aus. Ist die Art des Ausgangsmaterials bekannt, also weiß man, wie die einzelnen Elemente in der Probe gebunden sind, so wird ein großer Anteil „gefunden“. Weiß man über Art und Herkunft der Probe nicht Bescheid, und gibt man beispielsweise vor, dass alle Elemente als Oxide vorkommen, dann werden diese Elemente nicht in Form komplexer Verbindungen ausgewiesen und es fehlt ein Rest auf 100 %.

Um dies zu verdeutlichen, befindet sich im Anhang 22 bis Anhang 24 ein Beispiel einer Talkprobe, welche einmal gemessen und auf drei verschiedene Arten ausgewertet wurde. Bei der ersten Auswertung wurden die Elemente als Oxide ausgegeben ( $\Sigma=86,72\%$ ). Bei der zweiten Auswertung wurde dem Auswertungsprogramm vorgegeben, dass es sich bei der analysierten Proben um Talk handelt ( $\text{Mg}_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$ ). Es wurde also definiert, wie die Elemente Mg und Si gebunden sind. Diese Information über die vorliegende Matrix trug dazu bei, dass der Anteil an gefundenen Verbindungen von 86,72% auf 93,92% gesteigert werden konnte.

Eine abschließende Normierung auf 100% ist nur empfehlenswert, wenn Klarheit darüber herrscht, um welches Material es sich handelt und über 95% der Bestandteile gefunden werden. In diesem Fall werden nur die Hauptbestandteile in

der Probe merklich hochgerechnet. Der Gehalt der Nebenbestandteile in der Probe bleibt vernachlässigbar klein (siehe Anhang 23 und Anhang 24).

Da die genaue Zusammensetzung der im Rahmen dieser Masterarbeit analysierten Proben nicht bekannt ist, wurden die Ergebnisse der RFA der Aschen nicht auf 100% hochgerechnet. Aufgrund der Ergebnisse und den Erfahrungen der Laborantin würde eine Normierung auf 100% die Ergebnisse verfälschen.

Dieses Vorgehen ist laut Freimann das gebräuchlichste Verfahren bei der Probenvorbereitung zur Rohgutmischungsberechnung.

Anhand der erhaltenen Oxidanalysen der Aschen wurde im nächsten Schritt die Rohgutmischungsberechnung durchgeführt.

Ein Ausschnitt der Tabelle mit allen Messwerten ist in Anhang 3 zu finden.

---

#### **4.4 Auswahl der Ersatzrohstoffe**

---

Als ersten Schritt wurden Zielwerte für den Kalkstandard, den Silikatmodul und den Tonerdmodul festgelegt, welche durch die spätere Auswahl und Mischung der einzelnen Rohstoffkomponenten erreicht werden mussten, um eine geeignete Rohmehlmischung zur Klinkererzeugung herzustellen (siehe Tabelle 6).

Die Analyseergebnisse der ausgewählten Einzelproben, bei welchen es sich um verschiedenste Ersatzrohstoffe aus dem Wertschöpfungskreislauf der Bernegger Grupphandelt, wurden um die Kennzahlen KSt, SM und TM erweitert, um die Auswahl der einzelnen Komponenten zu erleichtern (Auszug dieser Datensammlung gemäß Anhang 3f).

Somit wurde das Hauptaugenmerk vorerst nur auf die oxidischen Hauptkomponenten des Klinkers gerichtet. Die Korrektur der Begleitstoffe wie MgO, SO<sub>3</sub>, Cl, etc. durch Variation der Rohstoffe erfolgte in einem weiteren gesonderten Schritt.

Vorgehensweise:

- 1) Auswahl der Proben mit einem KSt > 100
  - Dieses Kriterium wurde von den wenigsten Proben erfüllt. (siehe nachfolgende Tabelle)

Int. Scan-Nr.	Probe	KSt II	MgO	Herkunft / Rohstoffart
177	27	203,86	12,77%	Fa. Terra Amstetten / BA
207	33	164,14	11,81%	BVH Mayreder Gründe Traun / BA
208	34	170,27	12,09%	BVH Mayreder Gründe Traun / BA
209	35	171,04	12,66%	BVH Mayreder Gründe Traun / BA
210	36	163,91	12,48%	BVH Mayreder Gründe Traun / BA
-	49	150,70	11,41%	Filterkuchen Klaus II
-	X2	818,13	6,62%	Kalkschlamm Ground Unit Linz
-	X1	2.199,05	1,27%	Feinsand 0,5-2,0mm Pfaffenboden (Kalkstein)

**Tabelle 8: Liste der potentiellen Ersatzrohstoffe mit einem Kalkstandard >100**

- 2) Auswahl der Proben, welche als Silikatträger wirken
  - Viele Proben verfügbar (siehe Anhang 3)
- 3) Auswahl der Proben, welche als Aluminiumträger wirken
  - Viele Proben verfügbar (siehe Anhang 3)

Die Auswahl der Rohstoffe bzw. die Zusammenführung zur Rohmehlmischung erfolgte iterativ.

Die Herausforderung bei der Auswahl der Rohstoffkomponenten besteht darin, dass der Großteil der Proben zu hohe MgO-Gehalte aufweist, welche sich aber in Summe durch Streckung mit einem MgO-armen Rohstoff (z.B. Kalkstein) korrigieren und unter 2 % absenken lassen.

Es lässt sich eine Korrelation des CaO- und MgO-Gehalts feststellen; sprich der Gehalt an Magnesium steigt direkt proportional mit dem Gehalt an Calciumoxid an. Dies lässt sich durch die häufige Vergesellschaftung von Kalkstein und Dolomit begründen (vgl. Schumann 2007, S. 282 und S. 290).

Veranschaulichen lässt sich diese Tatsache am einfachsten durch die Probe 50, bei welcher es sich um den Filterkuchen aus der Kiesaufbereitungsanlage in Klaus handelt.

---

## **4.5 Die Mischungsberechnung – Zwei Herangehensweisen**

---

Im Rahmen der Literaturrecherche wurden zwei unterschiedliche Berechnungsverfahren gefunden.

In manchen Werken wird die Mischungsberechnung anhand der Analysewerte der ungeglühten Proben durchgeführt. Das heißt, die Berechnung erfolgte auf Basis des Materialchemismus im Urzustand. (vgl. Stark und Wicht 2000 S. 39f)

Andere Quellen führen die Mischungsberechnung anhand der Analysenwerte der geglühten Probe durch, also auf Basis der Ascheanalysen. (vgl. Freimann 2014) Anhand eines vereinfachten Berechnungsbeispiels in Anhang 4 wurde festgestellt, dass beide Lösungsansätze zum selben Ergebnis führen. Die durchgeführte Probe bestätigt, dass bei beiden Berechnungsverfahren die gleichen Werte für KSt II, SM, und TM erzielt werden.

Die Mischungsberechnung im Rahmen dieser Arbeit wurde anhand der Ascheanalysen durchgeführt und danach über den LOI auf die notwendige Menge je ungeglühten Rohstoff zurückrechnet, welche zur Klinkererzeugung benötigt werden würde.

Diese Variante wurde gewählt, weil die Elemente in der Asche durch den Glühprozess am ehesten als Oxide gebunden vorkommen. Durch diese Vorgehensweise ist die Probenmatrix bekannt, womit ein hoher Anteil an Verbindungen durch die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) detektiert werden kann.

---

## **4.6 Mathematischer Hintergrund der Mischungsberechnung**

---

Um das Verhältnis für die Mischung der ausgewählten Ersatzrohstoffe, wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, auf analytischem Weg zu ermitteln, wurde ein Gleichungssystem aufgestellt. Man wählte drei nicht korrelierende, relevante Kennwerte für die Zementherstellung in Verbindung mit der Massenkonstanz. Aus dieser Tatsache ergeben sich vier mögliche Ersatzrohstoffe pro Mischung.

Auf eine Erweiterung des Gleichungssystems und somit zusätzliche Rohstoffe pro Mischung wurde verzichtet, da bereits zum jetzigen Zeitpunkt ein hinreichend genaues Bild über die Eignung der Ersatzrohstoffe und die Verwendung der Mischungen getroffen werden konnte.

Das angewandte Berechnungsverfahren wird anhand der Rohmehlmischungsberechnung 13 in Anhang 5 erklärt.

Die Lösung des linearen Gleichungssystems erfolgt durch die Anwendung der Matrizenrechnung in der Form  $Ax=b$  mit der Koeffizientenmatrix  $A$  und dem Lösungsvektor  $b$ . Dabei werden zur Bildung der Ausgangsmatrix (Matrix  $A$ ) die Formeln für den KSt, den SM und den TM so umgeformt, dass alle Teile der Gleichung auf die linke Seite gehoben werden und das Ergebnis berechnet wird. Würde die Gleichung stimmen, wäre das Ergebnis dieser Umformung gleich Null. Da die Gleichung jedoch nicht stimmt, ist das Ergebnis ungleich null. Die Ergebnisse

der umgeformten Gleichungen werden dann in jeweils ein Feld der Matrix eingetragen. Gleiche Module stehen in der gleichen Zeile, die Rohstoffkomponenten werden spaltenweise eingetragen. Zur Erklärung des Berechnungsvorganges wird die Formel für den Kalkstandard herangezogen. So wird beispielsweise die KSt II –Formel

$$KSt II = \frac{100 CaO}{2,8SiO_2 + 1,18 Al_2O_3 + 0,65 Fe_2O_3}$$

zu

$$KSt II * 2,8SiO_2 + 1,18 Al_2O_3 + 0,65 Fe_2O_3 - 100 CaO = X_{KSt}$$

umgeformt.

Dieser, aus der Formel für den Kalkstandard und den Werten der Mischungskomponente A, berechnete Wert wird nun in das linke obere Eck der Ausgangsmatrix eingetragen. Die übrigen Werte errechnen sich nach demselben Schema. Das Ergebnis dieser Rechenschritte ist die Matrix A.

	Komponente X	Komponente Y	Komponente Z	Komponente W
Werte aus KSt	$X_{KSt}$	$Y_{KSt}$	$Z_{KSt}$	$W_{KSt}$
Werte aus SM	$X_{SM}$	$Y_{SM}$	$Z_{SM}$	$W_{SM}$
Werte aus TM	$X_{TM}$	$Y_{TM}$	$Z_{TM}$	$W_{TM}$

Tabelle 9: Bildung der Ausgangsmatrix A

Aus diesen drei Zeilen werden die ersten drei Gleichungen gebildet, indem behauptet wird, dass die Summe der Koeffizienten null ergeben muss (Lösungsvektor b).

Die vierte Gleichung basiert auf der Massenkonstanz, das heißt, dass der jeweilige Anteil der Ersatzrohstoffe X, Y, Z und W in Summe 100% ergibt. Dies ist in der ersten Zeile der Ausgangsmatrix ersichtlich.

Damit wurden die Koeffizientenmatrix A als auch der Lösungsvektor b als Berechnungsgrundlagen erstellt.

Lösungs- vektor b	Koeffizientenmatrix A			
1	1	1	1	1
0	X <sub>KSt</sub>	Y <sub>KSt</sub>	Z <sub>KSt</sub>	W <sub>KSt</sub>
0	X <sub>SM</sub>	Y <sub>SM</sub>	Z <sub>SM</sub>	W <sub>SM</sub>
0	X <sub>TM</sub>	Y <sub>TM</sub>	Z <sub>TM</sub>	W <sub>TM</sub>

Tabelle 10: Vervollständigung der Koeffizientenmatrix A und Lösungsvektor b

Um unser lineares Gleichungssystem in der Form  $Ax=b$  nun nach  $x$  lösen zu können, ist die Bildung der inversen Matrix  $A^{-1}$  notwendig.

Wenn die Determinante von A ungleich Null ist, kann die inverse Matrix  $A^{-1}$  von A bestimmt werden. Diese Probe als auch die Bildung der inversen Matrix erfolgte mithilfe der Berechnungstabelle in Anhang 5.

Multipliziert man das lineare Gleichungssystem  $Ax=b$  nun mit der inversen Matrix  $A^{-1}$ , so ergibt sich

$$A^{-1}(Ax) = A^{-1}b$$

Durch Auflösung der linken Seite der Gleichung gilt:

$$A^{-1}(Ax) = (A^{-1}A)x = Ex = x$$

mit der Einheitsmatrix E.

Setzt man nun die umgeformte linke Seite mit der rechten Seite der ursprünglichen Gleichung gleich, so folgt hieraus:

$$x = A^{-1}b$$

Das bedeutet, der Vektor  $x$  des linearen Gleichungssystems kann auf diese Weise über die Kenntnis von  $A^{-1}$  und  $b$  bestimmt werden.

Der Lösungsvektor  $x$  entspricht der gesuchten Rezeptur aus den vier Komponenten.

---

## 4.7 Ergebnisse der Mischungsberechnung

---

Die Ergebnisse der Mischungsberechnungen sind in Anhang 6 bis Anhang 18 zu finden. In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Mischungen besprochen. Eine Zusammenfassung und Ergebnisinterpretation erfolgt für alle Mischungen gemeinsam.

---

### 4.7.1 Raw Mix 01 und 02

---

Im Zuge der ersten Mischungsberechnungen wurde das Ziel verfolgt, für das Rohmehl ausschließlich Ersatzrohstoffe aus der Umwelttechnik zu verwenden. Tabelle 11 und Tabelle 12 geben Aufschluss über die Art, Herkunft und den Anteil der jeweiligen Komponente in den Rohmehlmischungen.

Raw Mix 01			
Probennr.	Art	Herkunft	Anteil [%]
27	PAK (Teeröl) verunreinigter Boden	Terra Amstetten	63,86
6	Bodenaushubmaterial sowie ausgehobenes Schüttmaterial, KW-verunreinigt, nicht gefährlich	BVH Wessenthaler	8,33
16	Schwermetallbelasteter Bodenaushub (PB & Cd), weiters PAK belastet	Sanierung Mayredergründe Ground Unit Linz	2,08
13	PAK-verunreinigte Böden aus verschiedenen BVH	ZWL Ternberg	25,73
			100,00

**Tabelle 11: Zusammensetzung des „Raw Mix 01“**

Raw Mix 02			
Probennr.	Art	Herkunft	Anteil [%]
27	PAK (Teeröl) verunreinigter Boden	Terra Amstetten	61,97
6	Bodenaushubmaterial sowie ausgehobenes Schüttmaterial, KW-verunreinigt, nicht gefährlich	BVH Wessenthaler	15,67
16	Schwermetallbelasteter Bodenaushub (PB & Cd), weiters PAK belastet	Sanierung Mayredergründe Ground Unit Linz	2,13
13	PAK-verunreinigte Böden aus verschiedenen BVH	ZWL Ternberg	20,23
			100,00

**Tabelle 12: Zusammensetzung des „Raw Mix 02“**

Die Ergebnisse der beiden Mischungsberechnungen sind in Anhang 6 und Anhang 7 dargestellt und werden im Folgenden diskutiert.

---

Für die Auswahl der ersten Ersatzrohstoffe als Rohmehlbasis wurden im ersten Schritt jene Rohstoffe aussortiert, welche einen Kalkstandard über 100 aufweisen. Dies betrifft die Rohstoffe aus Tabelle 8 in Kapitel 4.4.

Wie bei Betrachtung der Tabelle 8 ersichtlich ist, weisen dieselben Ersatzrohstoffe (bis auf den hochreinen Kalkstein vom Steinbruch Pfaffenboden) gleichzeitig einen für die Zementerzeugung viel zu hohen MgO-Gehalt auf, welcher sich durch Zugabe der anderen Ersatzrohstoffe nicht unter den festgelegten Grenzwert absenken lässt. Gleichzeitig fällt auf, dass der Anteil an, durch die RFA nicht gefundenen Verbindungen sehr hoch ist (Summe der Elemente und Oxide nicht gleich 100%). Auf eine Normierung wurde (wie in Kapitel 4.8.1 beschrieben) dennoch verzichtet, da diese die Ergebnisse weiter verfälschen würde. Lediglich die Proben mit den Bezeichnungen X1 bis X4 wurden normiert, da deren chemische Zusammensetzung aus vorherigen Untersuchungen bekannt war und daher der Großteil der Verbindungen gefunden werden konnte (siehe dazu Anhang 3). Diese Werte stammen von älteren Untersuchungen, weshalb diese eine eigene Probenbezeichnung erhielten.

Der „Rest“ wurde nur bei der Zusammensetzung der fertigen Rohmehlmischung auf 100% normiert, um ersichtlich zu machen, wie hoch der unbekannte Anteil an der gesamten Rohmehlmischung ist.

Der „Rest“ stellt einen großen Unsicherheitsfaktor in der Mischungsberechnung dar, welcher der Einfachheit halber für die weitere Vorgehensweise vernachlässigt wurde.

Ferner besteht, wie bei den ersten beiden Mischungen Raw Mix 01 und 02, bei fast allen Rohmehlmischungen entweder eine Über- oder Untersulfatisierung. Ein Sulfatisierungsgrad unter 100% bedeutet, dass die Reaktivität des Aluminats im Vergleich zum undotierten Aluminat zunimmt.

Zur Erinnerung: Ein Sulfatisierungsgrad über 100% bedeutet, dass die Reaktivität des Aluminats im Vergleich zum undotierten Aluminat abnimmt. Weiters verlangt ein Sulfatisierungsgrad über 150% nach einem Bypass, welcher die schadstoffbeladenen Gase aus dem System abführt und so einer Ansammlung dieser Schadstoffe im Ofenkreislauf entgegenwirkt (siehe Kapitel 3.2.5).

Den Folgen sowie möglichen Lösungsansätzen zur Behebung des Alkalisulfatproblems, beispielsweise durch Variation der Rohmehlkomponenten, wird vorerst keine Aufmerksamkeit geschenkt. Aufgrund des Zieles, vorrangig



Ersatzrohstoffe aus Abfallströmen heranzuziehen, wird ohnehin mit einer umfangreichen und eher komplexen Anlagenausführung gerechnet. Die Herausforderung der Störelementabscheidung soll durch die Verwendung von geeigneten Bypasssystemen gelöst werden (siehe Kapitel 4.7.1).

Die flüssige Phase (LP) liegt bei den meisten Rohmehlmischungen knapp unter den Werten von handelsüblichem Klinker. Dies bedeutet, dass die Reaktion der Rohstoffkomponenten und Klinkerbestandteilen erschwert wird und die Bildung der C3S-Klinkerphase unvollständig abläuft.

Der obere Schwellenwert wird bei keiner Mischungsberechnung überschritten, was bedeutet, dass mit Schäden an der Ofenauskleidung nicht zu rechnen ist (siehe Kapitel 3.2.5).

---

#### **4.7.2 Raw Mix 03 bis 06**

---

Erst unter Verwendung des Kalkschlammes aus der Bodenwaschanlage Ground Unit in Linz als CaO-Träger konnte der MgO-Gehalt durch Variation der Rohstoffkomponenten und anschließender Feinabstimmung der Zielwerte unter die 5%-Grenze abgesenkt werden. Gleichzeitig stieg jedoch der SO<sub>3</sub>-Gehalt über die Grenze von 3,5%.

Durch den Anstieg des Schwefelgehalts (ausgewiesen als SO<sub>3</sub>) stieg gleichzeitig auch der Sulfatisierungsgrad was wiederum den Bedarf eines Bypasses bedeutet. (bereits in Kapitel 3.2.5 besprochen)

Die untenstehenden Tabellen geben Aufschluss über die Art, Herkunft und den Anteil der jeweiligen Komponente in den Rohmehlmischungen.

Raw Mix 03			
Probennr.	Art	Herkunft	Anteil [%]
X2	Kalkschlamm PAK und Benzol Kontaminiert	Altlastensanierung O76 Kokerei Linz Ground Unit	58,27
6	Bodenaushubmaterial sowie ausgehobenes Schüttmaterial, KW- verunreinigt, nicht gefährlich	BVH Wessenthaler	8,35
16	Schwermetallbelasteter Bodenaushub (PB & Cd), weiters PAK belastet	Sanierung Mayredergründe Ground Unit Linz	24,19
8	Bodenaushubmaterial sowie ausgehobenes Schüttmaterial, KW- verunreinigt, nicht gefährlich	Tankstelle Stiglechner, ZWL Ternberg	9,19
			100,00

**Tabelle 13: Zusammensetzung des „Raw Mix 03“**

Raw Mix 04			
Probennr.	Art	Herkunft	Anteil [%]
X2	Kalkschlamm PAK und Benzol Kontaminiert	Altlastensanierung O76 Kokerei Linz Ground Unit	57,23
40	Bodenaushubmaterial sowie ausgehobenes Schüttmaterial, KW- verunreinigt, nicht gefährlich	verschiedene BHV, Fa. RAG	6,97
16	Schwermetallbelasteter Bodenaushub (PB & Cd), weiters PAK belastet	Sanierung Mayredergründe Ground Unit Linz	28,79
1	PAK und TOC verunreinigter Bodenaushub	Tako, ZWL Ternberg	7,01
			100,00

**Tabelle 14: Zusammensetzung des „Raw Mix 04“**

Raw Mix 05			
Probennr.	Art	Herkunft	Anteil [%]
X2	Kalkschlamm PAK und Benzol Kontaminiert	Altlastensanierung O76 Kokerei Linz Ground Unit	50,58
40	Bodenaushubmaterial sowie ausgehobenes Schüttmaterial, KW- verunreinigt, nicht gefährlich	verschiedene BHV, Fa. RAG	7,69
16	Schwermetallbelasteter Bodenaushub (PB & Cd), weiters PAK belastet	Sanierung Mayredergründe Ground Unit Linz	9,64
1	PAK und TOC verunreinigter Bodenaushub	Tako, ZWL Ternberg	32,09
			100,00

**Tabelle 15: Zusammensetzung des „Raw Mix 05“**

Raw Mix 06			
Probennr.	Art	Herkunft	Anteil [%]
X2	Kalkschlamm PAK und Benzol Kontaminiert	Altlastensanierung O76 Kokerei Linz Ground Unit	45,99
40	Bodenaushubmaterial sowie ausgehobenes Schüttmaterial, KW- verunreinigt, nicht gefährlich	verschiedene BHV, Fa. RAG	7,57
5	PAK verunreinigter Bodenaushub	BVH Ennsleiten	0,55
1	PAK und TOC verunreinigter Bodenaushub	Tako, ZWL Ternberg	45,88
			99,99

**Tabelle 16: Zusammensetzung des „Raw Mix 06“**

Die Ergebnisse der vier Mischungsberechnungen sind in Anhang 8 bis Anhang 11 dargestellt.

#### 4.7.3 Raw Mix 07 und 08

Bei diesen beiden Rohmehlmischungen wurde versucht, Material aus der Altlastensanierung N6 zu verwenden. Bei dem Material handelt es sich um Aluminiumschlacke, welche im Vorfeld bereits umfangreich untersucht wurde.

Diese Aluminiumkrätze lässt sich zwar zur Klinkererzeugung heranziehen, der Anteil an diesem Material (Probe 46) ist jedoch mit unter einem Prozent sehr gering. Tabelle 17 und Tabelle 18 geben Aufschluss über die Art, Herkunft und den Anteil der jeweiligen Komponente in den Rohmehlmischungen.

Raw Mix 07			
Probennr.	Art	Herkunft	Anteil [%]
X1	Kalkstein, Feinsand	Kalksteinbruch Pfaffenboden	34,38
46	Aluschlacke	Altlastensanierung N6 Aluschlackendeponie Wr. Neustadt	0,13
X3	Schreddersand TBS	TBS Enns	0,21
1	PAK und TOC verunreinigter Bodenaushub	Tako, ZWL Ternberg	65,28
			100,00

**Tabelle 17: Zusammensetzung des „Raw Mix 07“**

Raw Mix 08			
Probennr.	Art	Herkunft	Anteil [%]
X2	Kalkschlamm PAK und Benzol Kontaminiert	Altlastensanierung O76 Kokerei Linz Ground Unit	39,02
46	Aluminiumschlacke	Altlastensanierung N6 Aluschlackendeponie Wr. Neustadt	0,06
X3	Schreddersand TBS	TBS Enns	0,17
1	PAK und TOC verunreinigter Bodenaushub	Tako, ZWL Ternberg	60,75
			100,00

**Tabelle 18: Zusammensetzung des „Raw Mix 08“**

Die Ergebnisse der beiden Mischungsberechnungen sind in Anhang 12 und Anhang 13 dargestellt.

#### 4.7.4 Raw Mix 09

Diese Rohmehlmischung stellt hinsichtlich erzielter Klinkerzusammensetzung die beste Kombination an Rohstoffen dar. Die Tatsache, dass rund 70% von einem primären Rohstoff (nämlich Kalkstein) stammen, lässt die Rohmehlmischung wieder unattraktiv werden.

Zur Erinnerung: Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, in erster Linie Ersatzrohstoff zur Klinkerherstellung heranzuziehen. Primäre, hochqualitative Rohstoffe, für welche ohnehin ein bestimmter Verwendungszweck besteht, sollen im Bedarfsfalle als Korrekturstoffe in einem zweiten Homogenisierungsschritt zur Anwendung kommen, um die festgelegte Zielqualität zu erreichen.

Die Verwendung von Schreddersand ist aufgrund seiner chemischen Eigenschaften möglich. Es stellt sich jedoch noch die Frage, ob der Einsatz aufgrund der physikalischen Eigenschaften an anderer Stelle im Prozess - z.B. am Kalzinator oder direkt beim Brenner - nicht zweckmäßiger wäre.

Die Tabelle 19 zeigt die erstellte Rohmehlmischung. Details zur chemischen Zusammensetzung sind in Anhang 14 zu finden.

Raw Mix 09			
Probennr.	Art	Herkunft	Anteil [%]
X1	Kalkstein, Feinsand	Kalksteinbruch Pfaffenboden	70,21
X3	Schreddersand TBS	TBS Enns	5,54
R10	(Sekundärabfall) aus dem Aufbereitungsprozess	Ground Unit, Nasstrennanlage	8,70
8	Bodenaushubmaterial sowie ausgehobenes Schüttmaterial, KW- verunreinigt, nicht gefährlich	Tankstelle Stiglechner, ZWL Halle Werk Ternberg	15,55
			100,00

**Tabelle 19: Zusammensetzung des „Raw Mix 09“**

#### 4.7.5 Raw Mix 10 bis 13

Bei diesen Rohmehlmischungen wurde der Kalkstein durch den Kalkschlamm aus der Bodenwaschanlage Ground Unit substituiert. Der MgO-Gehalt stieg dadurch wieder an, blieb jedoch unter der 5%-Marke. Für die Mischungen 11 und 12 wurde wieder das Aluschlackenmaterial aus der Altlastensanierung N6 verwendet. Durch Variation der Einsatzstoffe konnten dieses Mal bis zu 3% der Ersatzrohstoffe in die Rohmehlmischung miteinfließen. Bei der letzten Mischung wurden alle Ersatzrohstoffe bis auf den Kalkschlamm durch andere Rohstoffe substituiert, um zu zeigen, dass sich bereits mit den eher geringen Datensätzen eine Vielzahl an Rohmehlmischungen herstellen lassen.

Die Tabellen 20 bis 23 geben Aufschluss über die Art, Herkunft und den Anteil der jeweiligen Komponente in den Rohmehlmischungen. Details dazu sind wieder in Anhang 15 bis Anhang 18 zu finden.

Raw Mix 10			
Probennr.	Art	Herkunft	Anteil [%]
X2	Kalkschlamm PAK und Benzol kontaminiert	Altlastensanierung O76 Kokerei Linz Ground Unit	74,19
X3	Schreddersand TBS	TBS Enns	3,72
R10	(Sekundärabfall) aus dem Aufbereitungsprozess	Ground Unit, Nasstrennanlage	11,29
8	Bodenaushubmaterial sowie ausgehobenes Schüttmaterial, KW- verunreinigt, nicht gefährlich	Tankstelle Stiglechner, ZWL Halle Werk Ternberg	10,80
			100,00

**Tabelle 20: Zusammensetzung des „Raw Mix 10“**

Raw Mix 11			
Probennr.	Art	Herkunft	Anteil [%]
X2	Kalkschlamm PAK und Benzol Kontaminiert	Altlastensanierung O76 Kokerei Linz Ground Unit	74,38
X3	Schreddersand TBS	TBS Enns	4,51
R10	Filterkuchen aus dem regulären Aufbereitungsprozess Aufbereiteter PAK und Cr-belasteter Bodenaushub	Ground Unit, Nasstrennanlage	19,05
46	Aluminiumschlacke	Altlastensanierung N6 Aluschlackendeponie Wr. Neustadt	2,06
			100,00

**Tabelle 21: Zusammensetzung des „Raw Mix 11“**

Die Unterschiede aus Raw Mix 11 (siehe Tabelle 21) und Raw Mix 12 (siehe Tabelle 22) ergeben sich aus der Variation der Zielwerte. Im Speziellen wurden der Kalkstandard und der Silikatmodul im Rahmen des Zielwertebereichs verändert. Dies soll den Spielraum und die Auswirkungen auf die Zusammensetzung zeigen.

Raw Mix 12			
Probennr.	Art	Herkunft	Anteil [%]
X2	Kalkschlamm PAK und Benzol Kontaminiert	Altlastensanierung O76 Kokerei Linz Ground Unit	72,93
X3	Schreddersand TBS	TBS Enns	5,62
R10	Filterkuchen aus dem regulären Aufbereitungsprozess Aufbereiteter PAK und Cr-belasteter Bodenaushub	Ground Unit, Nasstrennanlage	18,36
46	Aluminiumschlacke	Altlastensanierung N6 Aluschlackendeponie Wr. Neustadt	3,08
			99,99

**Tabelle 22: Zusammensetzung des „Raw Mix 12“**

Raw Mix 13			
Probennr.	Art	Herkunft	Anteil [%]
X2	Kalkschlamm PAK und Benzol Kontaminiert	Altlastensanierung O76 Kokerei Linz Ground Unit	61,78
37	Bodenaushubmaterial sowie ausgehobenes Schüttmaterial, KW- verunreinigt, nicht gefährlich	verschiedene BHV, Fa. RAG	30,82
2	Bohrspülung/Bohrklein durch Polymerzusätze TOC verunreinigt	Fa. RAG, BVH Handenberg	0,73
R9	Filterkuchen aus dem regulären Aufbereitungsprozess Aufbereiteter PAK und Cr-belasteter Bodenaushub	Ground Unit, Nasstrennanlage	6,67
			100,00

**Tabelle 23: Zusammensetzung des „Raw Mix 13“**

#### 4.7.6 Raw Mix 14 bis 16

Im Rahmen der vorerst letzten Mischungsberechnungen wurde versucht, häufig anfallende bzw. jederzeit zur Verfügung stehende Ersatzrohstoffe in die Rohmehlmischung einzubauen.

In die Rohmehlmischung 14 wurde beispielsweise Cinerit (Flugasche) eingebaut, welche im Prozess der Papiererzeugung anfällt. Eine Herausforderung hierbei stellt der erhöhte Chlorgehalt dar.

Raw Mix 14			
Probennr.	Art	Herkunft	Anteil [%]
X2	Kalkschlamm PAK und Benzol Kontaminiert	Altlastensanierung O76 Kokerei Linz Ground Unit	63,01
X3	Schreddersand TBS	TBS Enns	6,26
R10	Filterkuchen aus dem regulären Aufbereitungsprozess Aufbereiteter PAK und Cr-belasteter Bodenaushub	Ground Unit, Nasstrennanlage	17,58
R1*	Cinerit (Flugasche)	EEVG Steyermühl	13,15
			100,00

**Tabelle 24: Zusammensetzung des „Raw Mix 14“**

Für die Mischung Nr. 15 wurde unter anderem sortenreiner Betonabbruch verwendet. In den RFA ist zu erkennen, dass das Betonrecyclingmaterial mit einem relativ hohen MgO-Gehalt belastet ist und daher nur zu einem gewissen Teil in die

Rohmehlmischung einfließen kann. Dieser hohe MgO-Gehalt liegt wahrscheinlich an den dolomitischen Gesteinskörnungen, welche für die Betonherstellung verwendet wurden.

Raw Mix 15			
Probennr.	Art	Herkunft	Anteil [%]
X1	Kalkstein, Feinsand	Kalksteinbruch Pfaffenboden	41,89
R4*	Betonrecycling (sortenrein)	div. BVH	49,94
R10	Filterkuchen aus dem regulären Aufbereitungsprozess Aufbereiteter PAK und Cr-belasteter Bodenaushub	Ground Unit, Nasstrennanlage	3,89
X3	Schreddersand TBS	TBS Enns	4,28
			100,00

**Tabelle 25: Zusammensetzung des „Raw Mix 15“**

Für die letzte Mischung wurde zusätzlich zum sortenreinen Betonabbruch sortenreiner Ziegelbruch hinzugemischt. Ziegelschutt konnte nur in sehr geringem Maße hinzugefügt werden, da die für die Klinkerherstellung nötige Tonkomponente bereits von anderen Ersatzrohstoffen geliefert wurde. Das heißt, die Verwendung substituiert bereits eingesetzte Ersatzrohstoffe.

Raw Mix 16			
Probennr.	Art	Herkunft	Anteil [%]
X1	Kalkstein, Feinsand	Kalksteinbruch Pfaffenboden	47,99
R5*	Ziegelbruch (sortenrein)	div. BVH	3,07
18	Schwermetallbelasteter Bodenaushub (PB & Cd), weiters PAK belastet	Sanierung Mayredergründe Ground Unit Linz	20,45
R4*	Betonrecycling (sortenrein)	div. BVH	28,49
			100,00

**Tabelle 26: Zusammensetzung des „Rax Mix 16“**

#### 4.7.7 Austauschbarkeit von einzelnen Rohstoffkomponenten

Im ersten Schritt wurden mehrere Möglichkeiten von potentiellen Rohmehlmischungen gefunden. Leider fallen jedoch nicht immer exakt dieselben Ersatzrohstoffe an. Diese Tatsache verlangt nach Substituierbarkeit einzelner Rohmehlkomponenten durch andere Ersatzrohstoffe.



Aus diesem Grund wurde versucht, einzelne Komponenten der geglückten Rohmehlmischungen durch „ähnliche“ Stoffe zu ersetzen. Die Herausforderung dabei ist, dass es kaum Proben in der vorhandenen Datensammlung gibt, welche auch nur annähernd ähnliche Module besitzen.

Aufgrund der Art und Herkunft der für die Rohmehlmischungen verwendeten Ersatzrohstoffe lässt sich auch nicht vorhersagen, wann ein vom Chemismus her ähnlicher Rohstoff das nächste Mal anfällt.

Ein denkbarer Lösungsansatz wäre, in erster Linie mehrere Rohstoffkomponenten mit im Vorhinein definierten chemischen Eigenschaften festzulegen und Ersatzrohstoffe, welche die festgelegten Eigenschaften erfüllen, gezielt zu akquirieren. Im zweiten Schritt müssten von allen Ersatzrohstoffen, welche als potentielle Rohmehlmischungskomponenten für die Klinkererzeugung in Frage kommen, Oxidanalysen der Aschen durchgeführt werden, um damit die Datenquantität kontinuierlich zu erhöhen. Aufgrund der Ergebnisse könnten als letzten Schritt die einzelnen Stoffströme zu Rohstoffgruppen zusammengeführt und zwischengelagert werden. (siehe Kapitel 5.1.1)

Aufgrund der bis dato gesammelten Rohstoffdaten lassen sich zum jetzigen Zeitpunkt jedoch noch keine Rohstoffgruppen bilden.

Nichts desto trotz lässt sich aufgrund der erfolgreich erstellten Mischungen bereits zum jetzigen Zeitpunkt erkennen, dass es grundsätzlich möglich ist, Rohmehlmischungen unter Verwendung eines sehr hohen Anteils an Ersatzrohstoffen zu erstellen. Aus diesen Gründen wurde auf die Erstellung weiterer Mischungen verzichtet. Anzumerken ist hier, dass bis jetzt lediglich vier Materialien zur Mischungsberechnung herangezogen wurden. Unter Anwendung von komplexeren Rechenmodellen können noch mehr Rohstoffkomponenten zur Mischung herangezogen werden und damit gewiss ein gleichmäßigerer Zielwertbereich erreicht werden (siehe hierzu Kapitel 5.3).

---

## **4.8 Validierung der Ergebnisse**

---

Die vorliegenden Laborergebnisse der geglühten Probe wurden anhand des Glühverlustes (GV oder LOI) auf die chemische Zusammensetzung der Ausgangsprobe zurückgerechnet. Dieser Rechenschritt sollte eine Aussage darüber ermöglichen, in welchem chemischen Rahmen eine Analyse eines nicht

gebrannten Rohstoffs liegen müsste, um für die Verwendung als Ersatzrohstoff in Frage zu kommen.

Die Rückrechnung erfolgte unter der Annahme, dass nur der organische Anteil in der Ausgangsprobe verschwindet und Carbonate in deren Oxide umgewandelt werden. Aufgrund der RFA wird weiters angenommen, dass Elemente wie z.B. das Ca bereits vor dem Glühen als Oxide und nicht als Carbonate vorliegen. Die Umwandlung von  $\text{CaCO}_3$  zu  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgCO}_3$  zu  $\text{MgO}$  etc., welche durch den Glühvorgang stattfindet, wird also vernachlässigt.

Der durchgeführte Rechenschritt wird in der nachfolgenden Tabelle 27 anhand eines einfachen Beispiels ersichtlich gemacht.

Geglühte Probe		LOI	Rechenschritt	Theoretische Ausgangsprobe
Komponente A	20%	50%	$20 \times 0,5$	10%
Komponente B	80%		$80 \times 0,5$	40%
LOI				50%
Summe	100%			100%

**Tabelle 27: Berechnung der theoretischen Ausgangsprobe vor dem Glühen**

Durch den vorangegangenen Glühprozess verflüchtigen sich weiters Elemente wie Cl oder Hg und sind daher in der Rückrechnung vernachlässigbar. (vgl. Achternbosch und Bräutigam 2000, S. 26)

Diese Vorgehensweise wird lt. anerkannten Zementtechnologien in der Praxis so gehandhabt.

Theoretisch gesehen sollten daher die Laborergebnisse des externen akkreditierten Prüflabors mit jenen der rückgerechneten Analyseergebnissen der geglühten Proben übereinstimmen.

Tatsächlich ergaben sich jedoch große Unterschiede zwischen den Ergebnissen des externen Prüflabors und der im eigenen Haus durchgeführten Ascheanalysen. Diese Schwankung der Analyseergebnisse wird anhand der Probe 7 (Scan Nr. 101-2012) (Prüfbefund in Anhang 25) in der folgenden Tabelle ersichtlich gemacht.

Element/Oxid	Wert	Anmerkungen
<b>Werte aus Laborbefund der ungeglühten Probe :</b>		
LOI [%]	2,5	bei 550°C
Mg [ppm]	40.200	Königswasseraufschluss
Ca [ppm]	231.000	Königswasseraufschluss
<b>Stöchiometrisch berechnete Werte der ungeglühten Probe:</b>		
MgO [%]	6,67	4,02% x 1,658 (Näherung)
CaO [%]	32,32	23,10% x 1,399 (Näherung)
<b>Berechnete Werte der theoretisch geglühten Probe:</b>		
MgO [%]	6,84	$6,67 / (1-(0,025/100))$
CaO [%]	33,15	$32,32 / (1-(0,025/100))$
<b>Werte aus Laborbefund der geglühten Probe:</b>		
LOI [%]	32,27	bei 950°C
MgO [%]	8,11	RFA
CaO [%]	34,77	RFA
<b>Berechnete theoretische Ausgangsprobe auf Basis Asche RFA &amp; LOI:</b>		
MgO [%]	5,49	$8,11 \times (1-0,3227)$
CaO [%]	23,55	$34,77 \times (1-0,3227)$

**Tabelle 28: Vergleich der Analyseergebnisse der geglühten und ungeglühten Probe 7 und dessen Ergebnisunschärfe (Scan Nr. 101 - 2012)**

Bei diesem Berechnungsbeispiel ist zu erkennen, dass die Werte in den orange bzw. den blau hinterfüllten Feldern voneinander abweichen. Diese Tatsache lässt nun an der Glaubwürdigkeit der Analyseergebnisse zweifeln.

Im folgenden Kapitel wird daher versucht, die Ursache bzw. die Ursachen dieser festgestellten Abweichungen zu untersuchen.

#### 4.8.1 Mögliche Ursachen für die Unschärfe der Ergebnisse

##### a) Probenahmefehler - keine sachgemäße Probenteilung

Ein Grund für die Unschärfe der Ergebnisse könnte eine im Vorfeld nicht sachgemäße Probenteilung bei einer sehr inhomogenen Probe sein. Dies hätte zur Folge, dass sich die vom externen Prüflabor untersuchte Probe von der hausintern untersuchten Rückstellprobe in ihrer Zusammensetzung

grundlegend unterscheidet. Auch bei Anwendung der gleichen Analysenmethode würden sich die Ergebnisse unterscheiden.

**b) Unterschiedliche Analyseverfahren**

Die Anwendung unterschiedlicher Analyseverfahren stellt ebenfalls eine potentielle Fehlerquelle dar. So dient zum Beispiel die Untersuchung unter Anwendung des Königswasseraufschlusses und anschließender ICP-Analyse hauptsächlich der Untersuchung der Spurenelemente in der Probe. Durch diese Methode ergibt sich möglicherweise ein Verdünnungsfehler, da nur ein sehr geringer Teil der Probe untersucht wird. Für eine Abschätzung der Genauigkeit oder der Zuverlässigkeit des ermittelten Ergebnisses müsste das Prozedere beim Königswasseraufschluss genauer betrachtet werden. Wenn z.B. ein Rückstand erkennbar ist, so bedeutet das, dass ein Teil der Probe nicht gelöst wurde und damit dieser Teil der Probe nicht in das Analyseergebnis miteingeflossen ist.

Für einen „Vollaufschluss“ wäre die Zugabe von Flusssäure notwendig, um auch den Rückstand aufzulösen (nähere Ausführungen siehe Kapitel 4.8.2.).

**c) Der fehlende Anteil auf 100 %**

Die RFA der Aschen ergab unter Miteinbeziehung des Glühverlustes eine Summe von i.M. 90 %. Welche Elemente sich in den übrigen 10 % befanden, bleibt ungewiss. Zum größten Teil handelt es sich dabei um komplexe Verbindungen, welche durch die RFA unbekannt bleiben (siehe dazu Kapitel 4.3).

**d) ungeeignete Eichprobe**

Der Fokus der Untersuchungen mittels Königswasseraufschluss und ICP-Analyse durch das externe Prüflabor liegt auf Spurenelementen wie Cr, V oder Pb, welche sich im ppm-Bereich befinden. Damit kommt es zur Verfälschung jener Werte, welche im %-Bereich liegen wie z.B. Ca oder Mg (siehe auch Kapitel 4.8.2).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass aufgrund der festgestellten Ungenauigkeiten angenommen werden kann, dass einige der analysierten

Ersatzrohstoffe (Ascheanalyse) möglicherweise keinen so hohen MgO-Gehalt aufweisen, wie aufgrund der Ergebnisse zu schließen ist. Diese Erkenntnis hat zu berücksichtigen, dass jene Rohstoffe, welche einen hohen MgO-Gehalt aufweisen, nicht ohne Plausibilitätsüberlegung als möglicher Ersatzrohstoff ausgeschlossen werden.

An dieser Stelle wurde ein Versuch unternommen, die Ursache für die Unschärfe der Ergebnisse zu finden bzw. die Gründe dafür einzugrenzen. Dies erfolgte durch die Beprobung einzelner Rückstellproben unter Anwendung der verschiedenen Verfahren.

---

#### **4.8.2 Vergleich der Analyseverfahren**

---

Ziel des durchgeführten Versuchs war es, anhand von 3 unterschiedlichen Ausgangsproben die Messergebnisschwankung zwischen verschiedenen Messverfahren zu untersuchen. Inwiefern sich die Werte der geglühten Probe auf die Werte der Ausgangsprobe zurückrechnen lassen, wurde ebenfalls untersucht.

##### **I. Probenvorbereitung**

Im Vorfeld wurden 3 unterschiedliche Ausgangsproben (Rückstellproben) ausgewählt.

Diese wurden im Labor der Technischen Behandlungssysteme GmbH (TBS) fein aufgemahlen, homogenisiert und geteilt. Ergebnis dieser Probenvorbereitung waren homogene, fein gemahlene Ausgangsproben.

Eine Hälfte dieser geteilten Probe wurde bei 950°C geglüht. Die andere Hälfte blieb unbehandelt.

Danach wurden die beiden Proben nochmals geteilt.

Eine Hälfte der geglühten Probe sowie eine Hälfte der ungeglühten Probe wurde an das externe Prüflabor gesendet. Die anderen beiden Hälften wurden intern untersucht.

## II. Versuchsdurchführung

### A) TBS

Messverfahren: RFA kalibrierte Messung  
Auswertung: 1x Pressschmelze  
1x Carbonate  
1x Oxide  
Probenmenge: 10g

#### **Geglühte Probe:**

Die geglühte Probe wurde mit Wachs gemischt (8g Probe, 2g Wachs), da ohne Wachs keine Probenpräparation möglich war. Die gepresste Proben-tablette wurde mit standardloser Methode Multires-Vac 34 (keine Kalibrierung) gemessen und mit eigener Methode „Pressschmelze“ ausgewertet. Durch die Auswertungsmethode wurden der Wachsgehalt sowie der Glühverlust mitberücksichtigt.

Damit sollten die Analyseergebnisse die Zusammensetzung der Probe im Originalzustand wiedergeben.

Anmerkung: Aufgrund der Summe bei der Auswertung wurden die Messwerte nicht auf 100% gerundet. Nach Erfahrung der Laborantin sollte bei einer Summe <95% nicht gerundet werden, da hier offensichtlich etwas nicht gefunden wurde (C, Elemente leichter als Na, komplexe Verbindungen etc.) und eine Hochrechnung der Messergebnisse die Analyse maßgeblich verfälscht.

#### **Ungeglühte Probe**

Hier wurde die Probe nur gemahlen und nicht weiter vorbehandelt. Die unbehandelte Probe wurde mit Wachs gemischt (8g Probe, 2g Wachs), da ohne Wachs keine Probenpräparation möglich war. Die gepresste Proben-tablette wurde mit standardloser Methode Multires-Vac 34 (keine Kalibrierung) einmal gemessen und mit zwei unterschiedlichen Methoden ausgewertet.

Methode „Kalkstein“: Eigene Methode, wobei Ca und Mg als Carbonate ausgewertet werden.

Methode „Oxide“: Eigene Methode, wobei der Glühverlust händisch als CO<sub>2</sub> eingegeben wurde.

Anmerkung: Aufgrund der Summe bei der Auswertung wurden die Messwerte nicht auf 100% gerundet.

## **B) Agrolab**

Messverfahren: Für Al – Ti: ICP – Königswasseraufschluss  
für Si: Hausmethode Agrolab (nicht akkreditiert)  
für Cl und S: Agrolab Deutschland  
Probenmenge: 0,5g bei ICP

Die Zusammenfassung und Gegenüberstellung der Analyseergebnisse ist in Anhang 26 zu finden.

## **III. Ergebnisinterpretation**

### **1. Chlor**

Chlor wurde selten festgestellt. Dieses wurde nur bei Probe 443183 vom externen Prüflabor gefunden.

### **2. Schwefel**

Schwefel konnte nur durch das hausinterne Prüflabor nachgewiesen werden. Die gemessenen Werte für Schwefel sind dabei sehr konstant.

### **3. Silizium**

Alle Messverfahren liefern annähernd dieselben Ergebnisse.

### **4. Aluminium**

Hier bestehen große Abweichungen zwischen den Ergebnissen der TBS und des externen Prüflabors. Laborintern wurden durch die TBS annähernd konstante Werte gemessen, wobei bei allen drei Proben höhere Aluminiumwerte festgestellt wurden.

Mögliche Ursachen für die Abweichung:

Das Aluminium löst sich im Königswasser nicht vollständig auf. Dies könnte aufgrund von z.B. schwer löslichen Al-Si Verbindungen der Fall sein, da Silizium in Königswasser generell unlöslich ist. Beprobte wurde im Anschluss aber nur das Aluminium in der Lösung. Der Rückstand wurde vernachlässigt.

Möglicherweise liegt der hohe Al-Gehalt (TBS) aber auch an der standardlosen Messung.

## **5. Calcium**

Bei den erhaltenen Werten für das Calcium kann durchaus von einem guten Messergebnis gesprochen werden. Bei allen Proben wurden annähernd gleiche Messwerte erzielt.

Generell gilt aber, dass bei großen Mengen (im %-Bereich) eher auf die Ergebnisse aus der RFA zurückgegriffen werden sollte, da diese Messmethode auf größere Mengen ausgelegt ist.

Die ICP-Messung dient eher zur Feststellung von Spurenelementen im ppm-Bereich.

Das ICP-Messgerät ist z.B. auf 100 Teilchen kalibriert. Das Königswasser-Aufschlussgemisch beinhaltet jedoch Millionen von Teilchen, weshalb diese Lösung mehrere Male verdünnt werden muss. Durch diese Verdünnung kann das Messergebnis aber ausschlaggebend verfälscht werden (Verdünnungsfehler bei ICP).

## **6. Eisen**

Generell liefern auch die Werte für Eisen gute Ergebnisse, wobei durch das hausinterne Prüflabor wieder höhere Konzentrationen gemessen wurden. Auch hier gilt, dass für eine Abschätzung der Zuverlässigkeit wieder der Rückstand aus dem Königswasseraufschluss untersucht werden müsste.

## **7. Kalium**

Generell gilt, dass die „leichten“ Elemente wie Natrium Na, Kalium K, etc. mit dem RFA sehr schwer zu messen sind. Möglich oder einigermaßen zuverlässig ist die Messung erst ab Na, womit die erhaltenen Werte für Kalium mit Vorsicht betrachtet werden müssen. Durch das Prüflabor der TBS wurden hier oft doppelt so hohe Konzentrationen gemessen.

Zu den möglichen Ursachen zählen auch hier der Verdünnungsfehler, der Aufschlussfehler oder das standardlose RFA-Messverfahren.



## **8. Magnesium**

Gerade beim Magnesium, welches eines der knock out-Kriterien bei der Auswahl der Ersatzrohstoffe zur Mischungsberechnung darstellte, lieferten die Laborergebnisse sehr unterschiedliche Werte, wobei die Werte des externen Prüflabors meist höher liegen als jene Messergebnisse, welche durch das Labor der TBS geliefert wurden.

Der Magnesiumwert wurde offensichtlich als einziger durch das Glühen der Probe verfälscht. Das liegt womöglich daran, dass Mg in der Ausgangsprobe eher nicht-carbonatisch, gebunden vorliegt, sondern vielmehr in buntgemischten Verbindungen. Durch das Glühen wird der Wert stabilisiert, da Großteils aufoxidiertes MgO vorliegt.

## **9. Mangan**

Für Mangan wurden mehr oder weniger die gleichen Messergebnisse erzielt. Alle Werte liegen annähernd im selben Bereich.

## **10. Natrium**

Wie bereits bei Kalium erwähnt wurde, hat das RFA-Messverfahren Probleme, die leichten Elemente zu detektieren. Die Laborergebnisse der TBS lieferten Werte, welche dreimal höher liegen als jene Messergebnisse des externen Prüflabors.

Zu den möglichen Ursachen zählen wie bei Kalium auch hier der Verdünnungsfehler, der Aufschlussfehler oder das standardlose RFA-Messverfahren.

## **11. Phosphor**

Für Phosphor wurden relativ ähnliche Messergebnisse erzielt.

## **12. Titan**

Für Titan wurden vom Labor der TBS wieder höhere Werte gemessen, als durch das externe Prüflabor. Auch hier gelten der Verdünnungsfehler, der Aufschlussfehler oder das standardlose RFA-Messverfahren als mögliche Ursachen für die Unschärfe.

#### IV. Resümee – Vergleich der Analyseverfahren

Element	Übereinstimmung/Korrelation		
	Schlecht	Mäßig	Gut
Chlor		X	
Schwefel		X	
Silizium			X
Aluminium	X		
Calcium			X
Eisen		X	
Kalium		X	
Magnesium	X		
Mangan			X
Natrium	X		
Phosphor			X
Titan		X	

Tabelle 29: Vergleichende Betrachtung erzielter Messergebnisse

Trotz der z.T. in Kauf zu nehmenden Abweichungen der Messergebnisse sind die erhaltenen, auf unterschiedlichen Messverfahren gründenden Messwerte als Erfolg zu sehen.

Es wurde festgestellt, dass das Glühen der Probe, mit Ausnahme des Magnesiumwertes, die Messwerte nicht verfälscht. Vergleicht man die Werte der geglühten und auf den Originalzustand rückgerechneten Proben mit den Analysewerten der ungeglühten Probe so ist zu sehen, dass der Mg-Gehalt bei den geglühten und rückgerechneten Proben um durchschnittlich 63 % höher liegt, als der Mg-Gehalt der ungeglühten Probe.

Wird die chemische Zusammensetzung einer Probe im ungeglühten Zustand bestimmt, um diese Probe als potentiellen Ersatzrohstoff zur Klinkererzeugung zu identifizieren, ohne die tatsächlich vorhandene Mg-Verbindung zu kennen, so muss im Gedächtnis behalten werden, dass der MgO-Gehalt starken Schwankungen unterliegen kann. Wenn dieser MgO-Gehalt über z.B. 5% ansteigen würde hätte dies wiederum zur Folge, dass diese Rohstoffe fälschlicherweise für eine Rohmehlmischung nicht mehr in Frage kommen.

Leider wurden die Proben 411947 und 421152 im Jahr 2013 lediglich auf Fluorid im Eluat bzw. auf polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) getestet, weshalb für diese beiden Proben keine Vergleichswerte existieren. Vergleichswerte liegen nur für die Probe 443183 vor, welche doch recht deutlich von den jüngsten Messungen der Rückstellproben abweichen.

Der Hauptgrund der in Tabelle 28 aufgezeigten Ungenauigkeit liegt daher wohl am ehesten an sehr inhomogenen Proben und einer darauffolgenden nicht sachgemäßen Probenteilung, weshalb die Ursprungsprobe und die Rückstellproben bei demselben Analyseverfahren unterschiedliche Messergebnisse lieferten.

Zur Feststellung, welches Messverfahren verlässlichere Werte liefert, kann an dieser Stelle keine seriöse Aussage getätigt werden. Dafür müssten weitere kostspielige Untersuchungen durchgeführt werden.

Zur ersten Abschätzung und Berechnung von möglichen Rohmehlmischung reichen vorerst die Ergebnisse der Oxidanalysen der Aschen.

---

#### **4.9 Interpretation der Ergebnisse aus der Mischungsberechnung**

---

Bei der Betrachtung der Ergebnisse muss festgestellt werden, dass sich Rohmehlmischungen unter ausschließlicher Verwendung von Ersatzrohstoffen erschwert erzeugen lassen. Auch wenn die Rohmehlmischungen 10 bis 13 einen MgO-Gehalt unter 5 % aufweisen, so ist zu beachten, dass immerhin rund 10 % unbekannte Teile/chemische Verbindungen im „Rest“ verborgen bleiben. Ist darin nur ein wenig Mg enthalten, führt dies möglicherweise zu einem MgO-Gehalt in der Gesamtmischung von über 5 %. Damit wäre zumindest ein Ersatzrohstoff oder eventuell die gesamte Rohmehlmischung zu verwerfen.

Andererseits muss darauf hingewiesen werden, dass sich auch Proben mit einem ursprünglich hohen Mg-Gehalt (laut Abfallanalyse) aufgrund der Unterschiede in den Analysen, vielleicht dennoch als möglicher Ersatzrohstoff eignen.

Abgesehen davon wurde in Kapitel 4.7 gezeigt, dass Rohmehlmischungen zur Klinkererzeugung schon unter Anwendung vereinfachender Berechnungsansätze und dem Einsatz von lediglich vier Rohstoffkomponenten möglich sind. In der Zementindustrie gibt es nun eine Vielzahl an Mischungsberechnungsprogrammen, welche deutlich mehr als nur vier Rohstoffkomponenten zur Klinkererzeugung heranziehen. Dadurch lässt sich die Rohmehlmischung weiter optimieren und so

aus Ersatzrohstoffen aus der Sparte *Umwelt* ein klinkerähnliches Qualitätsprodukt erzeugen. (siehe Kapitel 5.3)

Abschließend kann festgehalten werden, dass durch den teilweisen Einsatz von Kalkstein als Primär-Rohstoff ,wie bei Rohmehlmischung 9, eine Vielzahl von praktikablen Rohmehlmischungen möglich sind. Des weiteren kann somit die laut ÖNORM EN197-1 festgelegte Obergrenze von 5 % für MgO und darüber hinaus auch die Qualitätsgrenze von 2 % MgO nach Freimann 2014 eingehalten werden.

---

## 5 Anlagenbau und Verfahrenstechnik

---

Ursprünglich wurde das Ziel verfolgt, die Erkenntnisse der Mischungsberechnungen zu nutzen, um in weiterer Folge Schlüsse für die detaillierte Auslegung der Homogenisierung des Rohguts zu ziehen. Dies galt insbesondere für

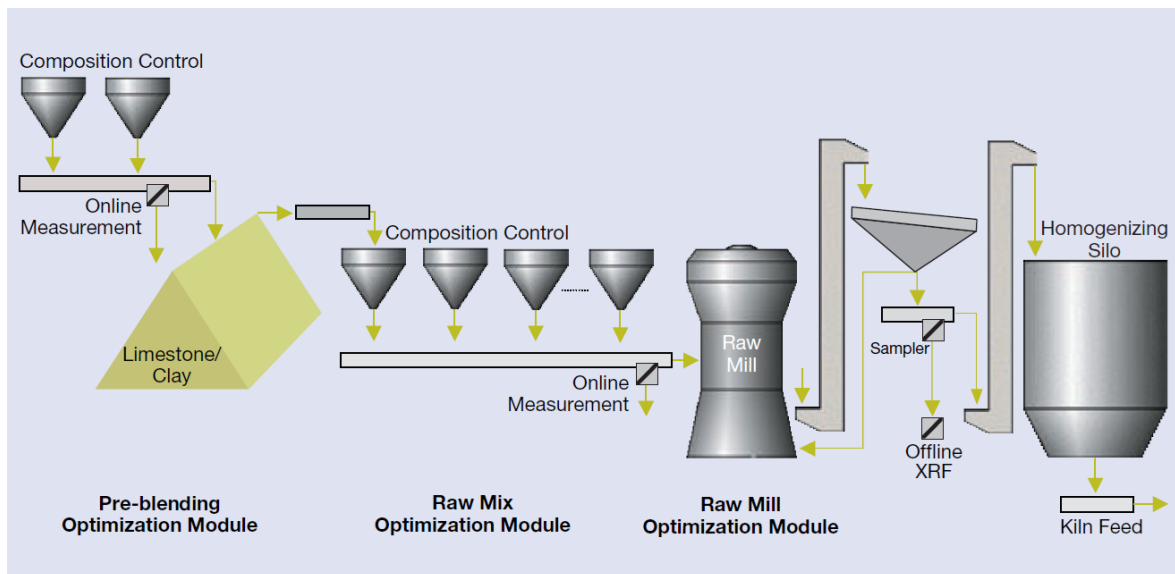
- die Größe des Zwischen-/Anlieferlagers, dessen Gestaltung bis hin zur nötigen Anzahl der Lagerboxen oder Silos sowie
- die Auslegung der Homogenisierungshalde unter Zuhilfenahme von statistischen Methoden, basierend auf den Schwankungen der Inputströme.

Die sehr beschränkte Anzahl an möglichen Mischungen und die daraus resultierende große Diversität machen eine Verwendung als Designgrundlage in dieser Detailliertheit zum jetzigen Zeitpunkt zwecklos.

Aufgrund dessen behandelt dieses Kapitel einerseits den Stand der Technik und etwaige bereits in der Branche umgesetzte Verfahren und Anlagenkonzepte zur Rohmehlhomogenisierung. Des Weiteren soll andererseits auf das Ziel der Maximierung des Einsatzes von Ersatzrohstoffen aus der Sparte *Umwelt* und die damit einhergehenden Besonderheiten eingegangen werden. Aufbauend auf eine kurze Marktübersicht sollen schwerpunktmäßig folgende Fragen thematisiert werden:

Wie könnte eine Lagerung und Homogenisierung aussehen, um das Materialhandling bei der Rohstoffannahme so effizient wie möglich zu gestalten. Wie könnten die qualitativen Schwankungen am Produkt eingedämmt werden, trotz der Herausforderungen in Bezug auf die zeitlichen, mengenmäßigen sowie chemischen und physikalischen Änderungen? Wie könnten diese Schwankungen ausgeglichen werden?

Untenstehend ist die Rohmehlaufbereitung eines klassischen Zementwerks dargestellt. Im Folgenden wird jedoch nicht auf sämtliche, auf der Abbildung illustrierten Bereiche eingegangen, sondern lediglich auf jene, die vom Stand der Technik abweichen oder besondere Betrachtung durch die gesteckten Ziele benötigen. Über die Abbildung hinaus wird nur auf etwaige Möglichkeiten der Reduktion von Schadstoffen durch verschiedenste Bypässe eingegangen.



**Abbildung 8: Vereinfachte Darstellung der Rohmehlaufbereitung**  
 (Quelle: ABB Schwitserland Ltd o.J., S. 3)

## 5.1 Zwischenlager

Bedingt durch das Ziel der Verwendung von Ersatzrohstoffen aus der Umwelttechnik müssen unter anderem bei der Lagerung besonders die gesetzlichen Regelungen des Abfallregimes und die damit einhergehenden hohen bescheidmäßigen Auflagen berücksichtigt werden. Dem kann durch die Ausgestaltung der Hallen und Freiflächen, wie bereits jetzt an den Standorten Enns oder anderen Recyclingplätzen verwirklicht, Rechnung getragen werden.

Die zur Herstellung der Rohmehlmischung verwendeten Ersatzrohstoffe müssen je nach Beschaffenheit bereits vor deren Einlagerung ausreichend zerkleinert werden (Kantenlänge in etwa 30 mm). (vgl. VDZ 2002, S. 47)

Diese primäre Zerkleinerung kann entweder bereits durch mobile Brechanlagen am Anfallort erfolgen oder mithilfe von semimobilen Abfallbehandlungsanlagen auf einem der bewilligten Recyclingplätze der Bernegger GmbH.

Die wahrscheinlich größte Herausforderung in der Zementerzeugung aus Ersatzrohstoffen aus der Umwelttechnik ist die Homogenisierung der zur Verfügung stehenden Rohmaterialien. Die Rohmaterialschwankungen können durch gesonderte Vorhomogenisierungen der einzelnen Komponenten ausgeglichen werden. (vgl. VDZ 2002, S. 48)

Dies wird verstärkt durch die Vielzahl der infrage kommenden Baustellen und Projekte. Trotz umfangreicher Literaturrecherche wurden keine expliziten Aussagen

gefunden, wie eine praxisnahe Organisation und Ausgestaltung der Materialannahme sowie der temporären Zwischenlagerung möglich wäre. Zu diesem Zweck wurden eigenständig unterschiedliche Zwischenlagerszenarien angedacht.

---

### **5.1.1 Bildung von Rohstoffgruppen**

Die erste Überlegung war es, viele Rohstoffe mit ähnlichen Eigenschaften zu Rohstoffgruppen mit annähernd gleichen chemischen Eigenschaften zu bilden (ähnlich Tabelle 7 aus Kapitel 4.1.3). Diese Rohstoffgruppen sollten dann als Hauptbestandteile zur Klinkererzeugung herangezogen und die Zielwerte unter geringer Dosierung von Korrekturstoffen erreicht werden.

Aufgrund der geringen Anzahl an Rohstoffdaten und der großen Unterschiede zwischen den einzelnen Rohstoffen (siehe Kapitel 4.7.7 „Austauschbarkeit von einzelnen Rohstoffkomponenten“) ist dieser Lösungsansatz zur Materiallagerung aus heutiger Sicht nicht zielführend oder umsetzbar.

---

### **5.1.2 Lagerung pro Baustelle**

Diese Option verlangt bei einer Vielzahl an Baustellen eine Vielzahl an Lagerboxen und demzufolge einen nicht bewältigbaren logistischen Aufwand. Im Gegensatz dazu lässt sich an dieser Stelle aus langjähriger Erfahrung festhalten, dass bei großen Baustellen aufgrund von z.B. unterschiedlichen Kontaminationen des Baugrundes diese andererseits enorme chemische Unterschiede aufweisen und eine Lagerung pro Baustelle in diesem Fall ebenfalls nicht zielführend ist.

---

### **5.1.3 Flexible Kombinationen**

Grundsätzlich wird für eine qualitativ als auch quantitativ hochwertige Datenbank in Zukunft jede denkbare Ersatzrohstoffquelle auf deren chemische Eigenschaften zu untersuchen sein (Oxidanalyse der Asche). Aufgrund der kontinuierlichen Untersuchungen kann dann entschieden werden, ob der Materialstrom als Ersatzrohstoff in Frage kommt und weiters in welcher Weise dieser gelagert werden soll. Je nach Ergebnis der Untersuchung kann der Materialstrom entweder separat gelagert, mit anderen Rohstoffquellen zu einer definierten Rohstoffgruppe zusammengefasst oder bei Bedarf nach gewissen Parametern zusätzlich aufgeteilt

werden. Aufgrund der im Vorhinein nicht vorhersehbaren Rohstoffaufkommen hinsichtlich Art, Anfallsort, Anfallsmenge wie auch Periodizität des Anfallens wird die Lagerung der Rohstoffe zunächst nur in Lagerboxen möglich sein, welche sich in ihrer Größe flexibel gestalten lassen (z.B. Betonwürfelbauweise).

---

## **5.2 Online-Materialanalyse**

---

Die Qualitäten der Rohstoffe für die Zementherstellung müssen sorgfältig kontrolliert und kontinuierlich überwacht werden, damit auch die Qualität des erzeugten Produkts den vorgegebenen Anforderungen entspricht. Ungewollte Qualitätsveränderungen im Rohmehl führen zu mangelhaftem Zement und damit allenfalls zu kostspieligen Reparaturarbeiten an Bauwerken. (vgl. Leetham 2014, S. 2)

Aus diesem Grund und durch die gesteckten Ziele wird der Erläuterung der Möglichkeiten in diesem Bereich besonderes Augenmerk geschenkt.

Es besteht eine Vielzahl an Möglichkeiten, den Rohstoff auf dem bewegten Förderband auf seine chemischen Eigenschaften zu untersuchen. Die gewünschte Messgenauigkeit, die Umweltbedingungen, die zu bestimmenden Rohstoffeigenschaften sowie die Rohstoffbeschaffenheit selbst spielen bei der Auswahl des Messsystems die entscheidende Rolle.

---

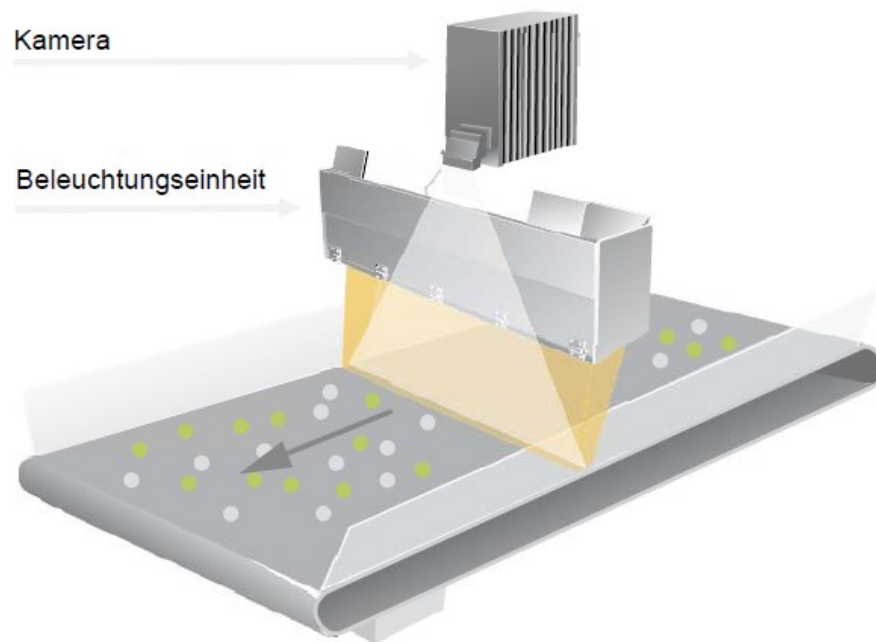
### **5.2.1 NIR – Nahinfrarot-Spektroskopie**

---

Die Nahinfrarot-Spektroskopie findet unter anderem Anwendung in der sensorgestützten Sortiertechnik, welche in Echtzeit berührungslos und zerstörungsfrei arbeiten. Sortiersysteme, die im Nahinfrarotbereich (Wellenlängen zwischen 2.500 nm und 780 nm) arbeiten, basieren auf dem Prinzip von Transmission und Reflexion von elektromagnetischer Strahlung. Bei der Bestrahlung im Infrarotbereich kommt es bei einer Vielzahl von Materialien zur Ausprägung ganz spezifischer Reflexionseigenschaften, d.h. Stoff A reflektiert den von einer Lichtquelle gesendeten Lichtstrahl mehr oder weniger gut wie Stoff B. Der reflektierte Lichtstrahl wird wiederum von einem Detektor aufgezeichnet. Durch die Ausnutzung dieses Effektes ist es möglich, Materialarten eindeutig und in Echtzeit bestimmen zu können. Vergleichbar mit einem „Fingerabdruck“ sind die Spektren, die durch das reflektierte Licht wiedergegeben werden, für jede Materialart

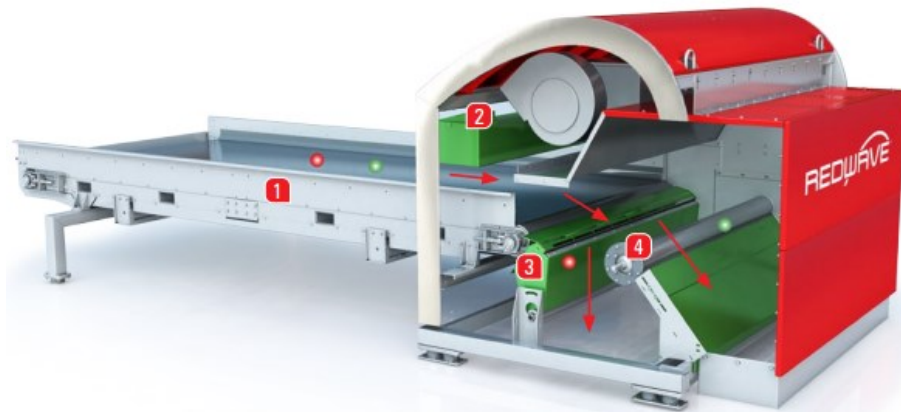


spezifisch (Prinzipskizze siehe Abbildung 9). Die vom Detektor gesammelten Daten werden mithilfe einer Software ausgewertet und Störstoffe im Materialstrom beispielsweise mithilfe einer pneumatischen Austragseinrichtung ausgeblasen. Ihr Einsatzgebiet liegt vor allem in der sensorgestützten Sortierung wie z.B. bei der Trennung von Kunststoff und Papier in Recyclingprozessen aber auch zur Überwachung von Beschichtungsprozessen. (vgl. Fleischhacker 2012, S. 7-12 und o.A., o.J, S. 3)



**Abbildung 9: –Schematische Darstellung der sensorgestützten Sortierung (Quelle: o.A., o.J., S. 9)**

Eine quantitative Vollanalyse von Gestein bezüglich der mineralischen Bestandteile oder eine chemische Elementanalyse ist mit NIR nicht möglich. Vielmehr wird NIR genutzt, um z.B. MgO-haltiges Gestein (Störstoff) von Kalkstein zu trennen.



- 1 Beschleunigungsband
- 2 Sensor und Lichtquelle
- 3 Ausblaseinheit
- 4 Angetriebene Trennrolle

**Abbildung 10: Sensorgestützte Sortierung von REDWAVE® zur Altpapiersortierung**  
(Quelle: o.A., o.J., S.2)

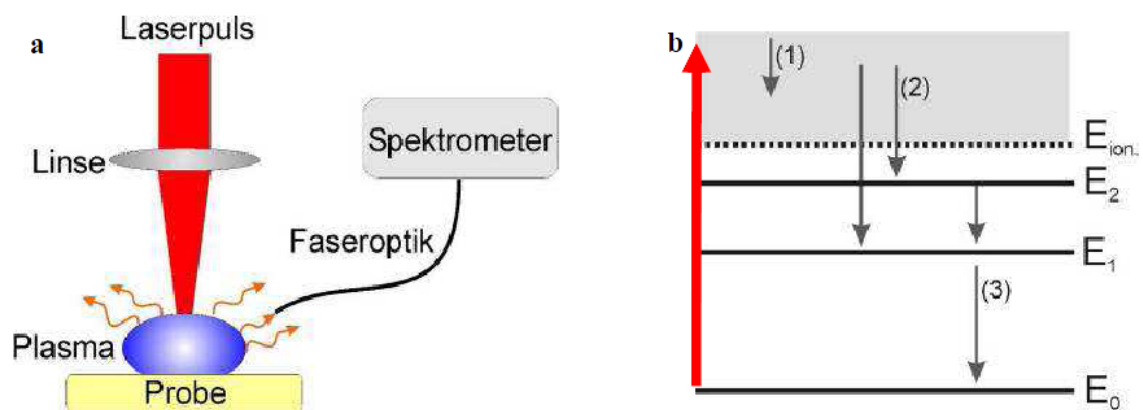
Daher ist dieses Verfahren für die Bestimmung der qualitativen bzw. quantitativen chemischen Zusammensetzung der Rohmehlmischung am Förderband nicht geeignet. Jedoch sollte in weiterer Folge angedacht werden, diese Methode zusätzlich anzuwenden, um den hohen MgO-Gehalt (wie in Kapitel 4 beschrieben) zu minimieren. Einerseits zur Reduktion der Grenzwerte, andererseits zur Vergrößerung der Zahl der infrage kommenden Ersatzrohstoffe.

### 5.2.2 LIBS – Laserinduzierte Plasmaspektroskopie (Laser-induced breakdown spectroscopy)

*„LIBS steht für „Laser-induced breakdown spectroscopy“ (Laserinduzierte Plasmaspektroskopie). Es ist eine schnelle und berührungslose Technik zur Elementaranalyse von festen, flüssigen oder gasförmigen Stoffen. Die analytische Atomemissionsspektroskopie beruht auf einer thermischen Atomisierung beziehungsweise teilweisen Ionisierung einer Probe in einem laserinduzierten Plasma.“ (Feierabend 2014, S. 1)*

*„Wenn ein gepulster Laserstrahl auf eine Probe fokussiert wird und die Intensität über einem bestimmten Grenzwert liegt, verdampft Material und es entsteht ein Plasma (ein gasförmiges Gemisch aus Ionen, Elektronen und*

angeregten neutralen Atomen beziehungsweise Molekülen) an der Probenoberfläche. Die Probe wird im Plasma dissoziiert, atomisiert und teilweise ionisiert. Die angeregten Atome und Ionen im Plasma emittieren kontinuierliches (Abbildung 11b (1) und (2)), sowie ein charakteristisches (Abbildung 11b (3)) optisches Spektrum. Eine spektroskopische Analyse dieses Spektrums erlaubt eine qualitative und quantitative chemische Analyse des untersuchten Materials. LIBS erlaubt die sichere Identifikation sämtlicher Elemente des Periodensystems anhand der charakteristischen Emissionslinien vom Ultravioletten (UV) über den sichtbaren Bereich (VIS) bis hin in das Nahe Infrarot (NIR).“ (Feierabend 2014, S. 1)



**Abbildung 11: Schematische Darstellung der LIBS-Funktionsweise**  
(Quelle: Feierabend 2014, S. 1)

Der Nachteil dieses Analyseverfahrens liegt darin, dass es sich bei diesem Verfahren um ein ausschließlich oberflächennahes und auf punktuellen Messungen beruhendes Analyseverfahren handelt. Die Messung am bewegten Förderband wäre kein Problem; jedoch können Staub am Fördergut oder variierende Feuchtigkeiten des Fördergutes das Messergebnis stark beeinflussen.



**Abbildung 12: Mit Kalkstein beladenes Förderband im Elfitunnel ( $k < 120\text{mm}$ ,  $\dot{V} = 500\text{-}700\text{t/h}$ )**

Weiters ist die Funktionstauglichkeit dieses Messverfahrens aufgrund fehlender Referenzen aus der Zement- und Kalkindustrie nicht erwiesen. Daher ist auch dieses Messverfahren für die Anwendung zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Rohgutmischung am Förderband nicht geeignet.

---

### **5.2.3 Spezielle und maßgefertigte Analysesysteme**

Im Rahmen einer Projektidee der Bernegger GmbH aus dem Jahr 2014 wurden verschiedenste Angebote für Produkte und Lösungen zur online-Materialanalyse direkt am Förderband eingeholt. Ziel dieses Projekts war es, eine geeignete Lösung für die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung des Kalksteins direkt auf dem bewegten Förderband zu finden. Dadurch sollte hochqualitativer Kalkstein für die Futtermittel- oder Glasindustrie von jenen Rohstofffraktionen unterschieden werden, welche für Bauzwecke eingesetzt werden. Die Analyse sollte noch im Steinbruchbereich durchgeführt werden, um die jeweilige Charge im Werk je nach festgestellter Qualität in separaten Bereichen zwischenzulagern.

Im Rahmen der geführten Gespräche wurden auch spezielle Verfahren zur Bestimmung der chemischen Eigenschaften des geförderten Schüttgutes angeboten. So z.B. die Implementierung einer „Miniaufbereitungsanlage inkl. vollautomatisiertem Labor zur chemischen Analyse“ direkt über dem Förderband.

Im Fall dieser einzigartigen Lösung sollte ein Hammerprobennehmer Proben vom laufenden Förderband nehmen, die Proben mit Hilfe kleiner Aufbereitungsaggregate gebrochen, gemahlen, klassiert und zu Tabletten gepresst werden, welche im Anschluss mittels RFA auf ihre chemischen Eigenschaften untersucht werden sollten.

Vorteil dieser Speziallösung wäre eine vergleichsweise rasche und vollständige chemische Analyse aller Inhaltsstoffe (auch Schwermetalle) bis in den ppm-Bereich. Die Nachteile dieser Lösung sind mitunter die hohen Kosten und die vielen bewegten Teile, welche diese Lösung für Fehler anfällig macht. Weiters geht mit dieser Lösung ein gewisser systematischer Fehler, bedingt durch die Arbeitsweise des Hammerprobennehmers, einher. Durch die notwendige Probenaufbereitung und der erst darauffolgenden Messung kommt es zusätzlich zu einer zeitlichen Verzögerung.

---

#### **5.2.4 PGNAA – Prompt Gamma Neutron Activation analysis (Cross Belt Analyzer)**

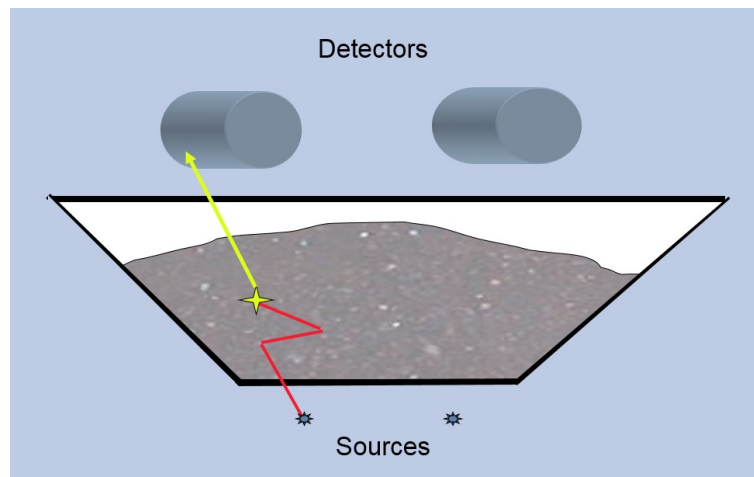
---

Das PGNAA-Verfahren ist das bestgeeignetste Messverfahren, wenn es darum geht, Informationen über die qualitativen und quantitativen chemischen Eigenschaften eines geförderten Materialstroms direkt auf dem Förderband, online, in Echtzeit, über den gesamten Querschnitt des Gutstroms, berührungslos und zerstörungsfrei zu erhalten. (vgl. Kurth o.J., S. 8)

Bei diesem Messverfahren wird unter dem Förderband, d.h. unter dem Materialstrom, eine Strahlungsquelle platziert, welche kontinuierlich Neutronen durch den Materialstrom sendet (siehe Abbildung 13). Die Wirkungsweise kann wie folgt beschrieben werden:

*„Trifft ein Neutron auf einen Atomkern, kommt es zu einer Absorption dieses Neutrons und damit zu einer Anhebung des Atomkerns auf eine höhere Energiestufe. Sobald die Energiezufuhr gestoppt wird, fällt der Atomkern sofort wieder in den Ausgangszustand zurück und emittiert dabei Gammastrahlung. Die einzelnen Elemente der Probe absorbieren Neutronen in unterschiedlicher Größenordnung und Energie und emittieren dadurch unterschiedlich viel Gammastrahlung. Diese Strahlung kann durch ein hochauflösendes Gammastrahlenspektroskop eingefangen und gemessen*

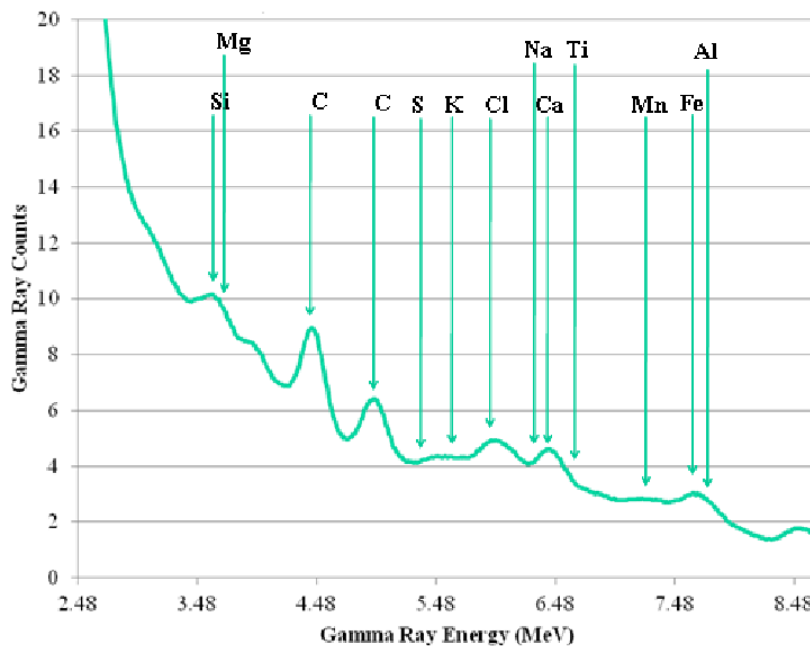
werden. Dadurch ist eine Identifizierung einzelner Elemente möglich. Hierzu werden die gemessenen Informationen mit bekannten Werten der Elemente verglichen. Zudem kann auch eine Aussage über die Konzentration der Elemente in der Probe getroffen werden.“ (Matthies 2008, S19f)



**Abbildung 13: Schematische Darstellung des PGNAA-Messprinzips  
(Quelle: Wiedmann 2014, S. 10)**

Die Wellenberge (peaks) des detektierten Spektrums repräsentieren die verschiedenen Elemente, die sich im Materialstrom befinden (siehe Abbildung 14). Die quantitative Bestimmung der einzelnen Elemente erfolgt über das Zeitintervall, in dem die Messung erfolgt. Das Spektrum wird kontinuierlich generiert. Die gemessenen Rohdaten werden durch die Förderbandbeladung korrigiert, welche durch eine Bandwaage ermittelt wird. Die gemessenen Daten werden weiters anhand der gemessenen Feuchtigkeit korrigiert. Das Resultat der Messung stellt die chemische Zusammensetzung der Trockenmasse dar, wobei die Ergebnisse in der Regel als gängige Oxide der jeweilig gemessenen Elemente ausgegeben werden (z.B. Si als  $\text{SiO}_2$ ). (vgl. Kurth o.J. S. 3)

Die Messung kann beispielsweise alle fünf Sekunden erfolgen, woraus alle 30 oder 60 sec. ein repräsentativer Mittelwert gebildet werden kann.

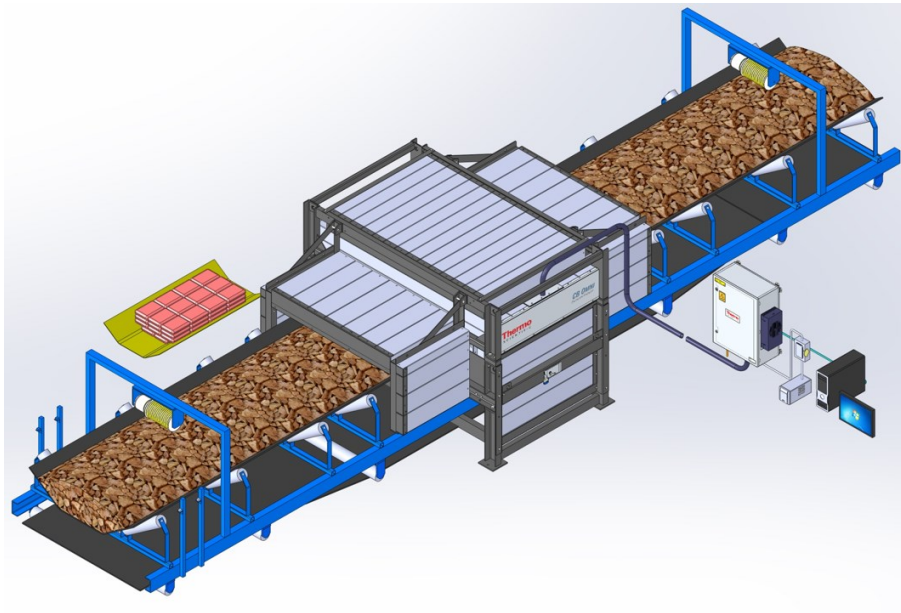


**Abbildung 14: Typisches Analysespektrum eines PGNAA-Messgeräts  
(Quelle: Kurth o.J., S. 3)**

In der Industrie haben sich zwei Methoden der Neutronenerzeugung durchgesetzt. Der bei weitem größte Anteil aller Cross-Belt-Analyser wird mit dem Isotop Californium  $^{252}\text{Cf}$  mit einer Halbwertszeit von 2,6 Jahren betrieben. Californium ist ein Permanentstrahler und damit ein verlässliches Strahlungsmedium. Die Umgebungsstrahlung um den Analysator bleibt durch die bauliche Abschirmung der Strahlenquelle und den für die Messung notwendigen, eher niedrigen Energielevel, von ca. 2,1 MeV relativ gering, weshalb keine Absperrung um das Analysegerät notwendig ist. Ökonomisch gesehen stellt die Neutronenerzeugung mittels  $^{252}\text{Cf}$  die kosteneffizienteste Lösung für den Großteil der Applikationen dar. Der Nachteil der  $^{252}\text{Cf}$ -Strahler ist das dauerhaft radioaktive Material, dessen Transport relativ kostenintensiv ist und im Fall von notwendigen Wartungsarbeiten „nicht einfach abgeschaltet“ werden kann. (o.A. 2012, S. 1)

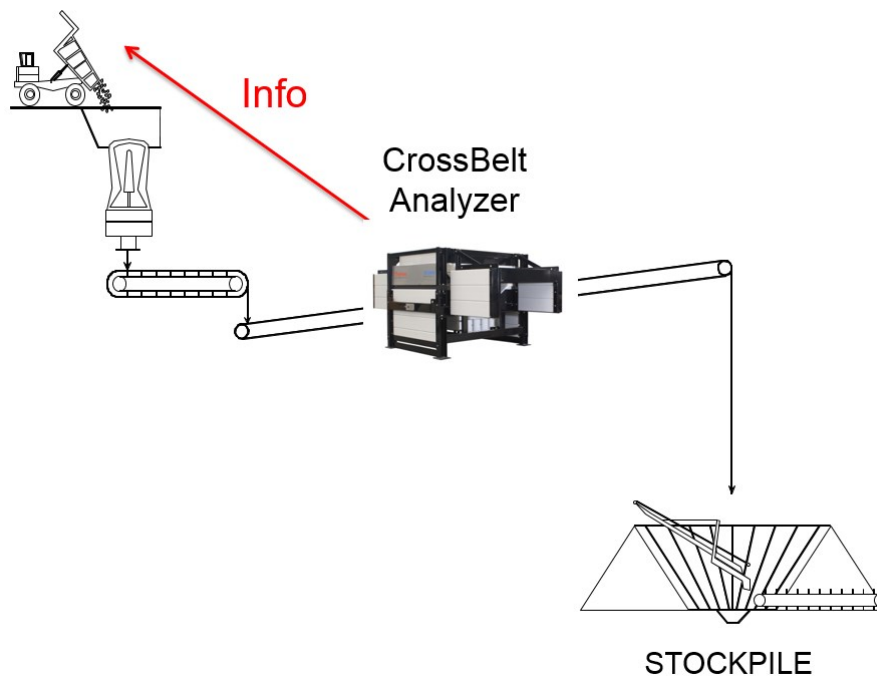
Als Alternative zum Isotopenstrahler gibt es die Neutronenröhre, welche sich einfacher transportieren und bei Bedarf auch abschalten lässt. Nachteil dieser Röhren ist die Zuverlässigkeit (notwendiges Ersatzteillager) und die höhere Strahlung, die sie bei der Messung generieren und der damit verbundene Mehraufwand für die sicherheitstechnische Abschirmung der Umgebung. Weitere Nachteile sind der hohe Anschaffungspreis und die höheren Betriebskosten. (vgl. Kurth o.J., S. 3f)





**Abbildung 15: PGNAA Cross Belt Analyzer von Thermo Fisher Scientific (CB Omni Analyzer) (Quelle: Wiedmann 2014, S. 2)**

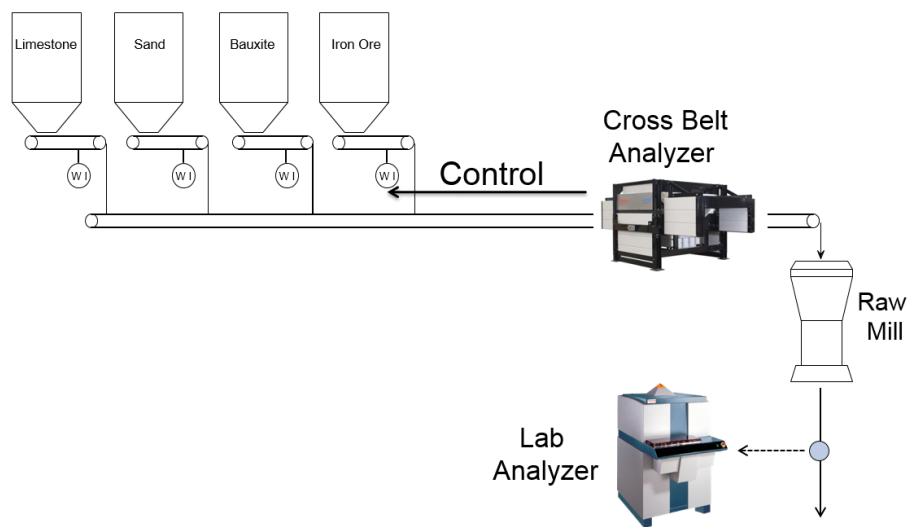
Im Nachgang sind zwei gängige Möglichkeiten zur Positionierung dieses Messgeräts veranschaulicht. Die erste Abbildung zeigt eine Anwendung nach dem Rohstofflager und vor dem Mischbett.



**Abbildung 16: Situierung des Cross-Belt-Analyzers zwischen Rohstofflagerboxen und dem Mischbett (Quelle: Wiedmann 2014, S. 6)**



Die zweite Alternative zeigt eine Situierung nach dem Mischbett und nach der Korrekturstoffzugabe.



**Abbildung 17: Situierung des Cross-Belt-Analyzers zwischen Korrekturstoffsilos und der Walzenschüsselmühle (Quelle: Wiedmann 2014, S. 21)**

In diesem speziellen Fall ist eine Nutzung beider Varianten förderlich für die Qualität des Klinkers.

PGNAA-Messdaten können mit RFA-Laborergebnissen ergänzt bzw. kombiniert werden, um den Prozessablauf zu optimieren. Anhand von Software zur Qualitätskontrolle der Rohmaterialien kann der Cross-Belt-Analyzer anhand der sehr genauen RFA-Laborergebnisse kontinuierlich kalibriert werden. (vgl. Leetham 2014, S. 2)

### 5.3 Software zur Mischungsberechnung

Die aus der zuvor beschriebenen Messtechnik gewonnenen Informationen lassen sich erst unter Verwendung einer ausgeklügelten Anlagensteuerung zur Rohmehlmischungsherstellung und deren Optimierung sinnvoll nutzen. Da dies wesentlich zur Erreichung der gesteckten Ziele beiträgt, gibt dieses Kapitel eine Erläuterung solcher Systeme und in weiterer Folge einen kurzen Überblick über am Markt verfügbare Produkte.

Erst durch die Anwendung von online-Messverfahren, welche die Qualität der Stoffströme in Echtzeit überwachen (siehe Kapitel 5.2) und die Anwendung einer geeigneten Mischungssoftware ist es möglich, das Anlagenpersonal kurzfristig mit

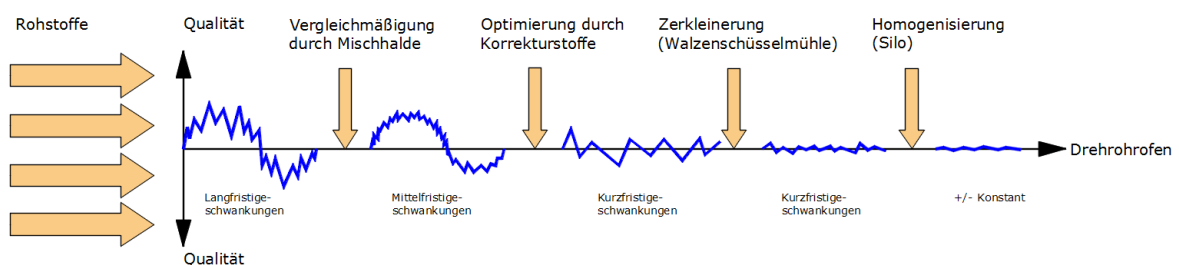
Informationen über die zu verwendenden Rohstoffe für eine geeignete Rohmehlmischung zu unterstützen.

Exemplarisch sind im Folgenden zwei mögliche Anbieter von Mischungssoftware zur Qualitätssteuerung des Rohmehls genannt:

- Optimize<sup>IT</sup> Raw Mix Preparation (RMP) von ABB Switzerland Ltd
- QCX Blend Master oder Blend Expert Software Package von FLSmidth

In vorliegendem Fall, also bei der bevorzugten Verwendung von Ersatzrohstoffen aus der Umwelttechnik sind die in Kauf zu nehmenden Schwankungen groß, weshalb mehrere „Rohstoffquellen“ zur Glättung dieser Schwankungen notwendig werden.

Die Verwendung einer solchen Software kann Schwankungen von Anfang an bzw. bereits vor der Mischhalde in einem gewissen Rahmen halten. Dadurch können vor allem die langzeitlichen und mittelfristigen Schwankungen ausgeglichen werden. Durch die Halde selbst erfolgt dann eine Homogenisierung des Rohmehls. Durch erneute Messverfahren nach der Halde lassen sich durch qualitativ hochwertige Korrekturstoffe wie Quarzsand, Kalkstein, bzw. Aluminium- und Eisenträger die kurzfristigen Schwankungen ausgleichen und die Rohmehlzusammensetzung optimieren. Danach wird das Rohmaterial mit gleichbleibenden chemischen Charakteristika zu Rohmehl gemahlen, welches danach im Homogenisiersilo weiter vergleichmäßigt wird. Steuerungen dieser Art greifen unterstützend in den gesamten beschriebenen Prozess ein, von der Auswahl des Materials noch vor der Aufgabe bis zum fertigen Klinker. (vgl. ABB Switzerland Ltd o.J., S. 3-7)



**Abbildung 18: Überblick über die Rohmehlschwankungen und die angewandten Vergleichmäßigungsschritte (vgl. ABB Switzerland Ltd o.J., S. 7)**

## 5.4 Der Bypass

Wie bereits im Kapitel 3.2.5 erwähnt wurde, wird für die Konzeptionierung und den Bau der thermischen Reststoffverwertungsanlage, aufgrund der bevorzugten Klinkerrohstoffe aus der Sparte *Umwelt*, ein Bypass unentbehrlich sein, da flüchtige Neben- und Spurenelemente sich in den Anlagen-Kreisläufen anreichern können. Diese Tatsache wurde durch die Vielzahl an durchgeführten Mischungsberechnungen bestätigt. Aus diesem Grund wurde auf dieses Verfahrensdetail, als eines der wenigen neben der Materialannahme sowie der Qualitätskontrolle und dessen -steuerung, näher eingegangen.

Um diese Anreicherungen zu reduzieren, existieren verschiedene Möglichkeiten. Die wichtigsten Bypasskonzepte sind in Abbildung 19 schematisch dargestellt. (vgl. Achternbosch und Bräutigam 2000, S 14)

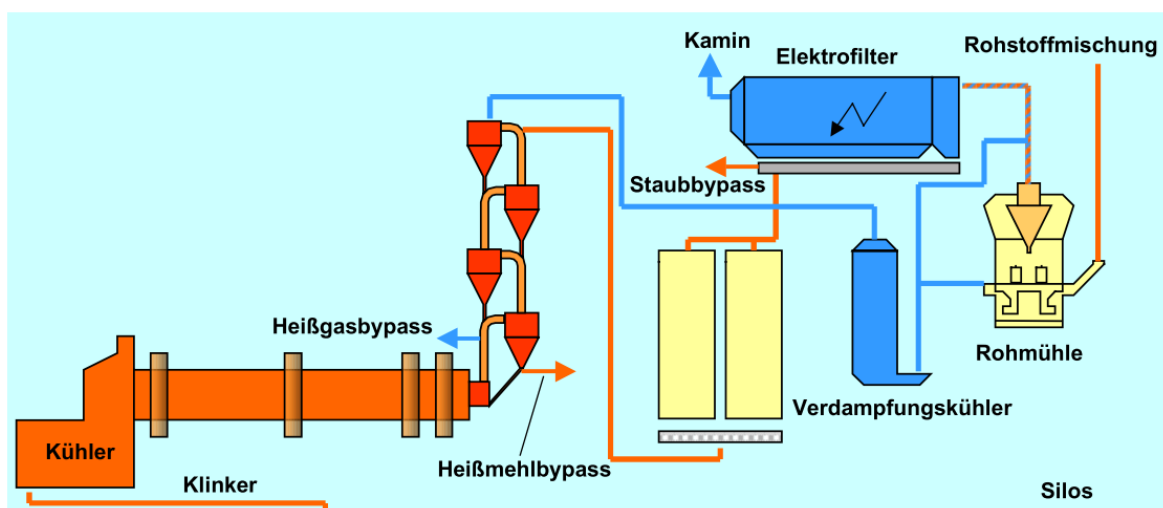


Abbildung 19: Schematische Darstellung verschiedener Bypasskonzepte  
(Quelle: Achternbosch und Bräutigam 2000, S 15)

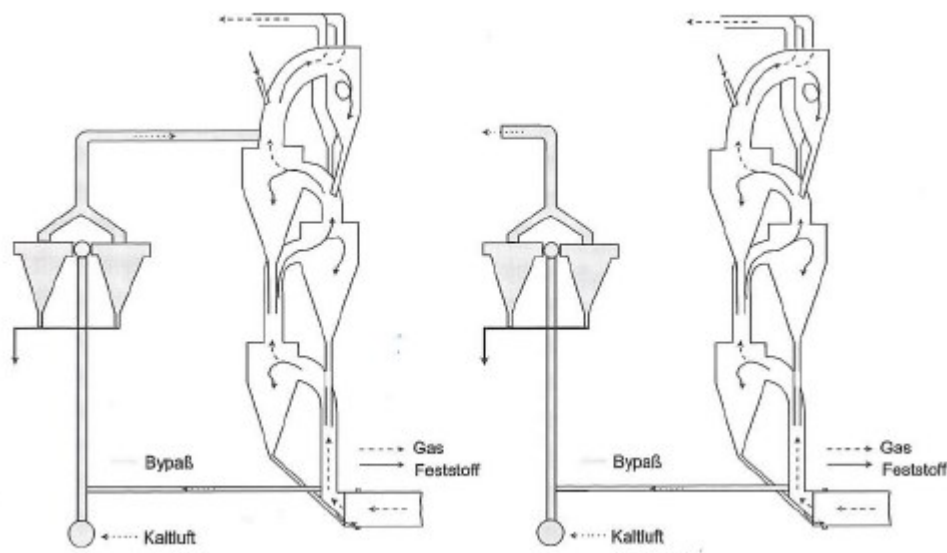
### Staubbypass

„Bei einem Staubbypass unterbricht man den äußeren Kreislauf. In diesem Fall wird ein Teil des Filterstaubs dem Rohmehl nicht mehr zugeführt, sondern ausgeschleust. Dies empfiehlt sich vor allem zur Entlastung des Schwermetallkreislaufs. In der Regel wird der abgetrennte Filterstaub, wenn die Zusammensetzung es erlaubt, dem Klinker in der Zementmühle zugemischt.“ (Achternbosch und Bräutigam 2000, S 14f)

Im Zuge der ersten Mischungsberechnungen wurde keine übermäßige Belastung durch Schwermetalle festgestellt. Sollten Schwermetalle in Zukunft ein Problem darstellen, lässt sich dies durch eine bedachte Verfahrenstechnik kontrollieren. Aufgrund von sehr vielen möglichen Ersatzrohstoffquellen und damit möglichen Störstoffen sollte von Anbeginn der Anlagenkonzeptionierung solch einen Bypass, oder zumindest die Option auf eine Erweiterung der Anlage mit einem Staubbypass, berücksichtigt werden.

### Heißgasbypass

*„Zur Minderung insbesondere der Alkalichloride und –sulfate bei einem insgesamt hohen Input an Alkali-, Schwefel- und Halogenverbindungen eignet sich ein Heißgasbypass, der an der Übergangsstelle von Drehrohröfen zum Zyklonvorwärmer einen Teil der Ofengase abführt. Die Ofengase werden je nach Betriebsweise unterschiedlich stark abgekühlt und gegebenenfalls entstaubt. Die Abgase können dann dem Hauptgasstrom wieder zugeleitet oder zur Mahltrocknung eingesetzt werden. Die entstaubten Gase können aber auch in einem Kamin abgeführt werden (siehe Abbildung 20).“ (Achternbosch und Bräutigam 2000, S 15)*



**Abbildung 20: Zwei Varianten von Heißgasbypassanlagen  
(Quelle: Stark und Wicht 2000, S. 51)**

Aufgrund des momentanen Wissensstands wird ein Heißgasbypass für die gegenständliche thermische Reststoffverwertungsanlage ein essentieller Anlagenbestandteil sein.

### **Heißmehlbypass**

*„Des Weiteren kann entweder kontinuierlich oder diskontinuierlich einen Teil des Ofenmehls an der Übergabestelle vom Drehrohrofen zum Zyklonvorwärmer ausgeschleust werden. In diesem Fall handelt es sich um einen Heißmehlbypass. Der Anlagenaufbau ist gegenüber dem Gasbypass einfacher und die Wärmeverluste sind geringer. Mit dem Heißmehlbypass kann z.B. der Chloridkreislauf entlastet werden, wenngleich hierfür der Gasbypass effektiver ist. Das abgetrennte Heißmehl wird dem Zement zugemahlen.“ (Achterbosch und Bräutigam 2000, S 15)*

---

## 6 Finanzielle Betrachtung – Standortwahl

---

Eines der Ziele dieser Masterarbeit war es, ein ausreichend detailliertes Anlagenschema zu entwerfen, auf dessen Basis sich die Investitionskosten abschätzen lassen. Aufgrund der Ergebnisse aus der Mischungsberechnung und die für das Verfahren entstandenen Folgen (siehe Kapitel 5) lassen sich die Investitionskosten zum heutigen Zeitpunkt noch nicht abschätzen. Daraus folgt, dass eine Investitionsrechnung für eine rationale Beurteilung über die Durchführung einer Investition nicht möglich ist. Das Risiko des Baues dieser Anlage kann auf wissenschaftlichem Niveau im Rahmen dieser Arbeit somit nicht beziffert werden und obliegt alleine einer unternehmerischen Entscheidung der Firma.

Ein weiteres großes Ziel war es, eine Kostenvergleichsrechnung hinsichtlich der ersparten Kosten durch die Verwertung von Abfall anstelle der momentanen Situation - der Deponierung - durchzuführen. Wie aus der Mischungsberechnung zu erkennen ist, lassen sich aus einer Vielzahl an Ersatzrohstoffen eine Vielzahl an Mischungen erzeugen, welche den chemischen Anforderungen an einen Klinker entsprechen. Wie groß nun der wirtschaftliche Nutzen durch die vermehrte Annahme von Abfall zur Erzeugung von Zement ist, lässt sich aufgrund der Ungewissheit, woher welcher Abfall und in welcher Menge in die Rohmehlmischung miteinfließt, nicht berechnen.

Leider wurden die im Rahmen dieser Arbeit doch sehr hoch gesteckten Ziele, einen ausbaufähigen Vorentwurf einer thermischen Reststoffverwertungsanlage zu entwickeln sowie eine Materialstromanalyse durchzuführen, nicht erreicht. Daher beschränkt sich dieses Kapitel auf die Ermittlung des vorteilhaftesten Standorts für den Fall eines Baues.

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit der Standortwahl der thermischen Reststoffverwertungsanlage mit Hauptaugenmerk auf die unterschiedlichen Transportkosten. Dafür wurden die Standorte der Bernegger GmbH in Enns/Ennschafan sowie der Standort in Spital am Pyhrn favorisiert, da für beide Standorte in absehbarer Zukunft ein ausgereiftes Verkehrskonzept unter Miteinbeziehung des Schienenverkehrs vorhanden sein wird. Durch die erweiterten Möglichkeiten beim Verkehrskonzept wird es in Zukunft durch den größeren Aktionsradius möglich sein, zusätzliche Ersatzrohstoffe für die Rohmehlmischungen zu akquirieren. Zudem kann am gewählten Standort ein Klinker/Zement erzeugt

werden und dieser entweder auf Eigenbaustellen zur Deckung des Eigenbedarfs zur Betonerzeugung verwendet oder in Ausnahmesituationen optional über die Bahn großräumig an Kunden verteilt werden.

---

## **6.1 Transportkosten Rohstoff**

---

In die Berechnung der Rohstofflieferpreise wurde als primärer Rohstoff nur Kalkstein berücksichtigt. Wie aus der Mischungsberechnung in Kapitel 4.7 ersichtlich ist, kann die Komponente Ton/Mergel vollständig durch Ersatzrohstoffe aus der Abfallwirtschaft ersetzt werden.

Die Kosten für die Anlieferung der Rohstoffe aus der Abfallwirtschaft für die Ballungszentren Wien, Salzburg und Graz wurden nicht als Absolutbeträge ermittelt, sondern stellen lediglich die Differenz der Transportkosten zwischen den jeweiligen Standorten dar. Begründet ist diese Vorgehensweise dadurch, dass es in diesem Kapitel nicht um die wirtschaftliche Betrachtung im Gesamten geht, sondern lediglich darum, welcher Standort aufgrund der Transportkosten zu bevorzugen ist. In weiterer Folge ist der Antransport zum nächstgelegenen Standort mit Transportkosten von null Euro bewertet. In die Rechnung fließen somit lediglich die Kosten des Weitertransports an den alternativen Standort ein.

Die in der Tabelle leicht grau hinterlegten Felder beinhalten die Transportkosten auf der Schiene und wurden von einem Angebot eines Eisenbahnunternehmens entnommen. Die restlichen Kosten entstehen durch den Transport per LKW und entsprechen jenen aus dem laufenden Betrieb der Bernegger Gruppe. (Quelle: Abteilung Controlling, Bernegger GmbH)

Die prozentuelle Verteilung der eingesetzten Ersatzrohstoffe stammt aus geführten Gesprächen und Abschätzungen der Experten aus der Abteilung Abfallwirtschaft der Bernegger GmbH. Eine statistische Auswertung nach dem Anfallsort der Ersatzrohstoffe aus der Abfallwirtschaft, welche für die Rohmehlmischungsberechnung herangezogen werden könnten, ist mangels der Ableitbarkeit von zukünftigen Projekten aus den bisher gewonnenen Erkenntnissen so nicht vorhanden oder erstellbar (vgl. Kapitel 4).

Transportkosten für Kalkstein als primäre Rohstoffkomponente						
Herkunft	Transportkosten [€/to]		Anteil [%]		Kosten [€/to]	
	Ziel		Ziel		Ziel	
	Spital/Pyhrn	Enns	Spital/Pyhrn	Enns	Spital/Pyhrn	Enns
Spital am Pyhrn	0	5	100%	50%	0,00	2,50
Molln	2	4,5	0%	50%	0,00	2,25
					<b>0,00</b>	<b>4,75</b>
Transportkosten für Rohstoffe aus der Umwelttechnik (Sekundär- oder Ersatzrohstoffe)						
Herkunft	Transportkosten [€/to]		Anteil [%]		Kosten [€/to]	
	Ziel		Ziel		Ziel	
	Spital/Pyhrn	Enns	Spital/Pyhrn	Enns	Spital/Pyhrn	Enns
Großraum Linz	4,5	2	65%		2,93	1,30
Großraum Wien	5	0	20%		1,00	0,00
Großraum Salzburg	2	0	10%		0,20	0,00
Großraum Graz	0	5	5%		0,00	0,25
					<b>4,13</b>	<b>1,55</b>

**Tabelle 30: Aufstellung der Transportkosten der Rohstoffkomponenten  
(Quelle: Abteilung Rohstoff, Bernegger GmbH)**

Sollte die thermische Reststoffverwertungsanlage in Spital am Pyhrn errichtet werden, so wird ausschließlich Kalkstein aus dem Steinbruch in Spital am Pyhrn (Kalksteinbruch „Schützenstein“) verwendet. Sollte die Anlage hingegen in Enns errichtet werden, so wird der Rohstoff von beiden Kalksteintagebauen (Molln und Spital am Pyhrn) angeliefert, je nachdem, wo geeignetes bzw. überschüssiges Rohgut anfällt. Die Berechnungen aus Tabelle 30 ergeben, dass der Transport für den primären Rohstoff (Kalkstein) nach Enns um 4,75 €/to<sub>Rohstoff</sub> teurer ist als der Transport nach Spital am Pyhrn.

Gerade in den Großstädten fallen häufig Materialströme aus der Abfallwirtschaft an, welche in Zukunft als Ersatzrohstoffe zur Zementerzeugung Verwendung finden könnten. Aufgrund der Nähe des Standortes Enns zu den Ballungszentren Linz, Wien und Salzburg ist im Fall von Ersatzrohstoffen der Standort Enns zu bevorzugen. Die Berechnungen aus Tabelle 30 ergaben, dass der Transport für Ersatzrohstoffe aus der Sparte *Umwelt* nach Spital am Pyhrn um 2,58 €/to<sub>Ersatzrohstoff</sub> teurer ist als der Transport nach Enns.

In dieser Berechnungstabelle wird das Verhältnis des Bedarfs an primären Rohstoffen zu Abfallstoffen noch nicht berücksichtigt.



## 6.2 Transportkosten Zement

Um die Transportkosten für den erzeugten Zement zu bestimmen, wurde zunächst der zukünftige Zementbedarf der einzelnen Betonmischanlagen der Bernegger GmbH abgeschätzt. Der Gesamtbedarf an Zement beläuft sich auf rd. 75.000 to pro Jahr. Diese Schätzung stammt aus der zuständigen Fachabteilung der Firma.

Da diese Transporte bis dato noch nicht durchgeführt wurden, müssen die Transportkosten kalkuliert werden. Die Kosten pro Tonne Zement und Straßenkilometer in Silo-LKWs stammen aus der Controllingabteilung der Bernegger GmbH. Die Transportdistanzen wurden aus Google Maps entnommen (siehe Anhang 27 bis Anhang 35).

Transportkosten [€/tokm]	0,13
--------------------------	------

Standorte der Betonwerke der Bernegger GmbH	Bedarf [to]	Zementwerk			
		Fahrtstrecke [km]		Transportkosten [€]	
		Spital/Pyhrn	Enns	Spital/Pyhrn	Enns
Spital/Pyhrn	10.000	0	102	-	132.600
Klaus/Pyhrnbahn	20.000	31	73	80.600	189.800
Ternberg	10.000	63	38	81.900	49.400
Dietach	15.000	74	24	144.300	46.800
Linz	20.000	95	20	247.000	52.000
<b>Gesamt</b>	<b>75.000</b>			<b>553.800</b>	<b>470.600</b>

**Tabelle 31: Aufstellung der Transportkosten für die Zementdisposition  
(Quelle: Abteilung Controlling, Bernegger GmbH)**

## 6.3 Gesamtkosten und Standortwahl

An dieser Stelle wird, basierend auf Erfahrungen der vergangenen Geschäftsjahre, angenommen, dass der Bedarf an Zement auch zukünftig durch die Hauptart CEM II lt. ÖNORM EN 197-1 zu decken sein wird. Somit bestehen 75.000 to Zement der Hauptart CEM II aus rd. 80% Klinker, da eine Verwendung von rd. 20% an Zumahlstoffen zulässig ist. Aufgrund der Unterschiede der Rohmehlmischungen (siehe Kapitel 4.7) wurde anstelle des tatsächlichen Verhältnisses von Rohmehl zu Klinker (auf Basis der Ergebnisse aus den Mischungsberechnungen) auf einen Wert aus der Literatur zurückgegriffen. Für die Erzeugung von einer Tonne Klinker sind in der Regel 1,5 - 1,6 Tonnen Rohmehl nötig, womit für 60.000 to Klinker 96.000 to Rohmehl benötigt werden. (vgl. Achternbosch und Bräutigam 2000, S. 28)

Es wurden mehrere Szenarien untersucht, welche sich durch unterschiedliche Rohmehlzusammensetzungen im Hinblick auf das Rohstoff-/Ersatzrohstoff-Verhältnis unterscheiden.

Szenario 1 spiegelt den Branchendurchschnitt in der Zementindustrie wieder, wo im Jahr 2011 13,6 % der natürlichen Rohstoffe durch Sekundärrohstoffe ersetzt wurden. (vgl. Scur 2013, S. 413)

Szenario 2 stellt den Fall dar, dass sich 100 % der Rohmehlmischungen mit einem zumindest 50 % hohen Sekundärrohstoffanteil herstellen lassen. Dies ist aus heutiger Sicht ein durchaus erreichbares Ziel.

Szenario 3 spiegelt einen eher optimistischen Ansatz wieder, bei dem angenommen wird, dass sich die Rohmehlmischung in einem von drei Fällen ausschließlich aus Ersatzrohstoffen aus der Abfallwirtschaft zusammensetzt und zwei von drei Fällen eine Mischung mit 50 % Primärrohstoff zur Anwendung kommt. Dies ergibt einen mittleren Ersatzrohstoffanteil von 67 %.

Aus der nachfolgenden Tabelle ist zu erkennen, dass der Standort Spital am Pyhrn für eine thermische Reststoffverwertungsanlage zur Klinkererzeugung erst ab einem primären Rohstoffanteil von 47 % und mehr als günstiger zu sehen ist (Szenario 4).

Rohmehl zur Klinkererzeugung 96.000 to	Szenario 1				Szenario 2			
	Anteil	Menge [to]	Kosten [€]		Anteil	Menge [to]	Kosten [€]	
			Spital/Pyhrn	Enns			Spital/Pyhrn	Enns
Natürlicher primärer Rohstoff	86%	82.560	-	392.160	50%	48.000	-	228.000
Rohstoffe aus Umwelttechnik	14%	13.440	55.440	20.832	50%	48.000	198.000	74.400
Kosten für Rohmehltransport [€]			55.440	412.992			198.000	302.400
Erzeugte Zementmenge	100%	75.000			100%	75.000		
Kosten für Zementtransport [€]			553.800	470.600			553.800	470.600
<b>Transportkosten Gesamt [€]</b>			<b>609.240</b>	<b>883.592</b>			<b>751.800</b>	<b>773.000</b>

	Szenario 3				Szenario 4			
	Anteil	Menge [to]	Kosten [€]		Anteil	Menge [to]	Kosten [€]	
			Spital/Pyhrn	Enns			Spital/Pyhrn	Enns
Natürlicher primärer Rohstoff	33%	31.680	-	150.480	47%	45.120	-	214.320
Rohstoffe aus Umwelttechnik	67%	64.320	265.320	99.696	53%	50.880	209.880	78.864
Kosten für Rohmehltransport [€]			265.320	250.176			209.880	293.184
Erzeugte Zementmenge	100%	75.000			100%	75.000		
Kosten für Zementtransport [€]			553.800	470.600			553.800	470.600
<b>Transportkosten Gesamt [€]</b>			<b>819.120</b>	<b>720.776</b>			<b>763.680</b>	<b>763.784</b>

**Tabelle 32: Gesamttransportkosten für unterschiedlichen Szenarien**

---

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

---

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass es theoretisch möglich ist, unter Verwendung eines hohen Anteils an Ersatzrohstoffen ein klinkerähnliches Produkt zu erzeugen, welches in den chemischen Eigenschaften jenen eines Portlandzementklinkers gleicht. Die erreichte Substituierbarkeit von primären Rohstoffen durch Ersatzrohstoffe aus der Abfallwirtschaft liegt, wie die bisher durchgeführten Untersuchungen zeigen, mit etwa 50 % bzw. teilweise sogar bis zu 100 % deutlich über dem Branchendurchschnitt der Zementindustrie und ist daher als Erfolg zu sehen.

Die auf Basis der rechtlichen Rahmenbedingungen vorgesehenen Analysen, welche für Abfälle ohnehin durchgeführt werden müssen, bilden eine vernünftige Basis für die Vorauswahl der möglichen Ersatzrohstoffe. Eine weiterführende Bewertung hinsichtlich deren Eignung als Ersatzrohstoff ist aufgrund der im Rahmen der gesetzlich zu prüfenden Elemente, welche wesentliche Parameter für die Zementerzeugung nicht enthalten, unmöglich.

Die im Zuge dieser Arbeit gewählte Vorgehensweise betreffend Vorbereitung und Analyse der Proben schafft auf praktikable Weise Abhilfe. Die dadurch zusätzlich erhaltenen Analyseergebnisse bilden eine geeignete Basis, mögliche Rohmehlmischungen zu berechnen und eine Aussage über die Eignung der einzelnen Ersatzrohstoffe zu treffen. Aufgrund des durchgeführten Methodenvergleichs ist jedoch eine Validierung und Würdigung der einzelnen Ergebnisse wesentlich, da bei speziellen Parametern eine signifikante Abweichung unter den Analysen herrscht. Somit ist diese Art der Betrachtung, im Sinne einer ersten Abschätzung der Projektumsetzbarkeit, sehr zweckmäßig.

Das angewandte Verfahren zur Probenvorbereitung und die darauf aufbauende Analyse liefern für den aktuellen Planungsstand ausreichend genaue Ergebnisse zur Mischungsberechnung. Eine umfängliche Grundlage für eine fundierte Entscheidung über die Tüchtigkeit einer Investition in eine thermische Verwertungsanlage ist jedoch noch nicht gegeben. Aus diesem Grund wird weiterführend empfohlen, auf diese Art ermittelte Rohmehlmischungen einer konkretisierenden Prüfung, unter anderem durch Brennversuche im Labormaßstab, zu unterziehen.

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse in Bezug auf die Konzeption des Verfahrens und das Design der Anlage und deren Peripherie konnten einige, aus heutiger Sicht wesentliche, Details näher erörtert werden. Aufgrund der Unvorhersehbarkeit in Bezug auf Menge, Zeitpunkt und Chemismus des Inputmaterials wird der Flexibilität, sowie in weiterer Folge der Qualitätssteuerung schon im Bereich der Materialannahme eine zentrale Rolle beigemessen. Im Hinblick auf die abgezielte Höhe der Quote an eingesetzten Ersatzrohstoffen werden der Umgang mit Störelementen und die etwaige Ausschleusung derer entscheidend. Somit kommt der Implementierung eines Bypasses eine wesentliche Bedeutung zu.

Bezogen auf eine mögliche Umsetzung konnte im Rahmen der Arbeit mit dem Ennshafen ein bestens geeigneter Standort gefunden werden. Dieser bietet sich durch die zentrale Lage für den Eingang der Abfälle zur als auch den Abtransport der Tennprodukte von der Aufbereitungsanlage an. Weiteres ist die nutzbare Infrastruktur in Form einer Anbindung an das hochrangige Straßennetz, den Schienenverkehr und auch Wasserwege an.

Diese Arbeit hat gezeigt, dass ein Einsatz von Ersatzrohstoffen über den Branchenschnitt hinaus möglich ist. Für das Unternehmen stellt dies eine interessante und weiter verfolgbare Chance dar, die Wertschöpfungskette zu schließen und neue Erfolgspotentiale zu nutzen. Aus diesem Grund wird durch die Erkenntnisse aus dieser Arbeit an der Implementierung einer strukturierten und kontinuierlichen Probenahme sowie einer nachfolgenden Probenvorbereitung und chemischen Analyse gearbeitet. Die dadurch gewonnene Datenbasis soll damit kontinuierlich wachsen und in Verbindung mit systematischen Brennversuchen als zukünftige Grundlage für eine Investitionsentscheidung dienen.

---

## 8 Literaturverzeichnis

---

### 8.1 Bücher und Zeitschriften

---

- Barry, T.I. und Glasser, F.P.: Calculations of Portland cement clinkering reactions, in: Advances in Cement Research, 2000, 12, No. , S. 19 – 28
- Basten, M.: Zementrohstoffe in Deutschland – Geologie, Massenbilanz, Fallbeispiele, Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, Verein Deutscher Zementwerke, Verlag Bau und Technik GmbH, 2002
- Benedix, R.: Bauchemie für das Bachelor-Studium, Modern-Kompetent-Kompakt, Springer Vieweg, 2014
- Henning, O. und Knöfel, D. und Stephan, D.: Baustoffchemie – Eine Einführung für Bauingenieure und Architekten, DIN e.V. (Hrsg.), Beuth Verlag, 2014
- Keil, F.: Zement – Herstellung und Eigenschaften, Springer-Verlag, 2013
- Kurth, H.: Real time on-belt elemental analysis using PGNAA for mineral processing plant control, Scantech International Pty Ltd Australia, o.J.
- Leatham, D.: PGNAA improves process and quality control in cement production, Thermo Fisher Scientific, Accelerating Science, 2014
- Locher, F.: Cement – principles of production and use, Verlag Bau+Technik GmbH, 2006
- o.A.: Thermo Fisher Scientific CB Omni on-line Analyse, Praxis und Wissen, BHM Berg- und Hüttenmännisches Monatsheft, BHM 157. Jg., Heft 6-7, Springer Journals, 2012
- Schumann, W.: Der große BLV Steine- und Mineralienführer, Mineralien, Erze, Edelsteine, Gesteine, Meteorite, 7. Auflage, BLV Buchverlag GmbH & Co. KG, 2007
- Scur, P.: Mineralische Sekundärrohstoffe für die Verwertung in der Zementindustrie – Anforderungen an die Qualität, in: Aschen Schlacken Stäube – aus der Abfallverbrennung und Metallurgie, Thomé-Kozmiesky, K.J. (Hrsg.), TK Verlag, 2013, S. 411-421
- VDZ: Zement-Taschenbuch 2002, Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.), 50. Ausgabe, Verlag Bau+Technik GmbH Düsseldorf, 2002
- Stark, J. und Wicht, B.: Zement und Kalk – Der Baustoff als Werkstoff, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.), Birkhäuser Verlag, 2000

---

### 8.2 Normen, Gesetze und Richtlinien

---

- ÖNORM EN 197-1:2011-09, „Zement Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement“

---

### 8.3 Internetquellen

- Lippold, B.: Glühverlust, Chemie.de Information Service GmbH, 2014, <http://www.chemie.de/lexikon/Gl%C3%BChverlust.html>, (02.11.2015)
- Mosci, R.: Understanding clinker liquid phase, 2011, <http://de.slideshare.net/RicardoMosci/1-liquid-phase>, (03.11.2015)
- o.A.: FLSmidth – QCX/Blend Expert, Broschüre, 2015, <http://www.flsmidth.com/en-US/Industries/Categories/Products/Laboratory+Solutions/Quality+Control+Software/Mix+Optimization+-+General/QCX+BlendExpert>, (12.01.2016)
- o.A.: Zement – VÖZ Vereinigung Österreichischer Zementindustrie, Zement + Beton Handels- und Werbeges.m.b.H., 2011a, <http://www.zement.at/zement/zement>, (06.10.2015)
- o.A.: Zementerzeugung – VÖZ Vereinigung Österreichischer Zementindustrie, Zement + Beton Handels- und Werbeges.m.b.H., 2011b, <http://www.zement.at/zement/zement/zementerzeugung>, (06.10.2015)
- Weilguni, M.: Bernegger GmbH – Über uns, o.J.a, <http://www.bernegger.at/index.php/ueber-uns.html>, (01.03.2015)
- Weilguni, M.: Bernegger GmbH – Über uns – Firmengruppe, o.J.b, <http://www.bernegger.at/index.php/ueber-uns/firmengruppe.html>, (02.10.2015)
- Weilguni, M.: Bernegger GmbH – Leistungen, o.J.c, <http://www.bernegger.at/index.php/leistungen.html> (02.10.2015)
- Weilguni, M.: Bernegger GmbH – Leistungen – Rohstoffe, o.J.d, <http://www.bernegger.at/index.php/leistungen/rohstoffe.html>, (02.10.2015)
- Weilguni, M.: Bernegger GmbH – Leistungen Bauwirtschaft, o.J.e, <http://www.bernegger.at/index.php/leistungen/bauwirtschaft.html>, (02.10.2015)
- Weilguni, M.: Bernegger GmbH – Leistungen – Umwelttechnik, o.J.f, <http://www.bernegger.at/index.php/leistungen/umwelttechnik.html>, (02.10.2015)

---

### 8.4 Sonstige Quellen

- Apfalter, M.: Neuerschließung „Trichterabbau Schützenstein“ – Technischer Bericht zum UVP-Feststellungsantrag inkl Einzelfallprüfung, ein Projekt der Bernegger GmbH, 2015
- Achternbosch, M. und Bräutigam, K.-R.: Herstellung von Zementklinker – Verfahrensbeschreibung und Analysen zum Einsatz von Sekundärbrennstoffen, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, Forschungszentrum Karlsruhe, 2000
- Döberl, G. und Müller, D.: Altlaststandort „Kokerei Linz“ – Gefährdungsabschätzung und Prioritätenklassifizierung (§13 und §14 Altlastensanierungsgesetz), Umweltbundesamt, 2009

- Döberl, G. und Weihs, S.: Altlast N6 „Aluminiumschlackendeponie“ – Gefährdungsabschätzung und Prioritätenklassifizierung (§13 und §14 Altlastensanierungsgesetz), Umweltbundesamt, 2010
- Enichlmayr, E.: Geologisch-lagerstättenkundliche Beschreibung, Gewinnungsbetriebsplan Kiessandabbau „Hart“, Geotec – Ziviltechnikergesellschaft für technische Geologie und Bergwesen GmbH Nfg. KG, GZ: 10/B/037 vom 10.11.2010, 2010
- Feierabend, A.: Analytische Auswertung von Kalkgesteinen, SECOPTA GmbH, Untersuchungsergebnis per E-Mail vom 06.05.2014, 2014
- Fleischhacker, S.: Stoffliche Verwertung von Abfällen – Einsatz der Nahinfrarot-Sortiertechnik im Bereich von Gewerbeabfällen, Masterarbeit, Institut für nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik für Saubermacher Dienstleistungs AG, 2011
- Freimann, W.: Beratungsgespräche im Zuge des Projekts „Thermische Reststoffverwertungsanlage“, 2014
- Matthies, E.: Grundlagenuntersuchung der Möglichkeiten einer Online Analyse mit Hilfe der Laser induzierten Plasmaspektroskopie (LIPS) am Beispiel von Kalkstein, Dissertation, 2008
- Nowotny, G.: Gewinnungsbetriebsplan 2015-2019 – Trichterabbau Pfaffenboden – „K.u.K. – Grubenfeld“, ein Projekt der Bernegger GmbH, 2014
- o.A.: Raw Mix Preparation – IndustrialIT Solutions for the Cement Industry, Broschüre, ABB Switzerland Ltd, O.J.
- o.A.: NIR-Spektroskopie – Sortiermesstechnik im Vergleich, Broschüre, LLA Instruments GmbH, o.J.
- o.A.: Papiersortierung – Anlagenlösungen Sensorgestützte Sortiermaschinen, REDWAVE, a division of BT-Wolfgang Binder GmbH, Broschüre, o.J.
- Thinel, K.-Ch.: Bauchemie und Werkstoffe des Bauwesens – Chemie und Eigenschaften mineralischer Baustoffe und Bindemittel, Universität der Bundeswehr München, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, 2008
- Wiedmann, C.: PGNAA for Cement & Coal, ppt-Präsentation, Angebot für die Bernegger GmbH 2014, Thermo Fisher Scientific, 2014

---

## 9 Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1: Firmenstruktur der Bernegger GmbH (Quelle: Weilguni o.J.b) .....	2
Abbildung 2: Die Kompetenzen der Bernegger Gruppe entlang des Wertschöpfungskreislaufes (Quelle: Weilguni o.J.c) .....	3
Abbildung 3: Schematische Darstellung des Zementherstellungsprozesses vom Steinbruch bis zum Versand (Quelle: Basten 2002, S. 18) .....	8
Abbildung 4: Konzentrationsbereiche von Haupt-, Neben- und Spurenelementen im PZ-Klinker (nach SPRUNG) (Quelle: Stark und Wicht 2000 S. 5) .....	9
Abbildung 5: Rückstreuелеktronenbild eines ungeätzten Portlandzementklinker-Anschliffs (Quelle: Stark und Wicht 2000, S. 8).....	12
Abbildung 6: Luftbildaufnahme des Trichterabbaus Pfaffenboden im Jahr 2014 .	23
Abbildung 7: Luftbildaufnahme des Kalktagebaus "Schützenstein" im Jahr 2015	24
Abbildung 8: Vereinfachte Darstellung der Rohmehlaufbereitung .....	58
Abbildung 9: –Schematische Darstellung der sensorgestützten Sortierung (Quelle: o.A., o.J., S. 9).....	61
Abbildung 10: Sensorgestützte Sortierung von REDWAVE® zur Altpapiersortierung .....	62
Abbildung 11: Schematische Darstellung der LIBS-Funktionsweise .....	63
Abbildung 12: Mit Kalkstein beladenes Förderband im Elfitunnel ( $k < 120\text{mm}$ , $V = 500\text{--}700\text{t/h}$ ) .....	64
Abbildung 13: Schematische Darstellung des PGNAA-Messprinzips.....	66
Abbildung 14: Typisches Analysespektrum eines PGNAA-Messgeräts .....	67
Abbildung 15: PGNAA Cross Belt Analyzer von Thermo Fisher Scientific (CB Omni Analyzer) (Quelle: Wiedmann 2014, S. 2) .....	68
Abbildung 16: Situierung des Cross-Belt-Analyzers zwischen Rohstofflagerboxen und dem Mischbett (Quelle: Wiedmann 2014, S. 6) .....	68
Abbildung 17: Situierung des Cross-Belt-Analyzers zwischen Korrekturstoffsilos und der Walzenschüsselmühle (Quelle: Wiedmann 2014, S. 21).....	69
Abbildung 18: Überblick über die Rohmehlschwankungen und die angewandten Vergleichmäßigungsschritte .....	70
Abbildung 19: Schematische Darstellung verschiedener Bypasskonzepte .....	71
Abbildung 20: Zwei Varianten von Heißgasbypassanlagen .....	72



---

## 10 Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 1: Durchschnittliche Schwankungsbreite der chemischen Zusammensetzung von PZ-Klinker (Quelle: vgl. Stark und Wicht 2000, S. 5).....	10
Tabelle 2: Chemische Anforderungen an den Portlandzementklinker.....	11
Tabelle 3: Die Hauptklinkerphasen (vgl. Stark und Wicht 2000, S. 7f) .....	11
Tabelle 4: Übersicht über die wichtigsten Kalkstandards und Module.....	14
Tabelle 5: Zusammenfassung der Zielwerte der einzelnen Module .....	15
Tabelle 6: Gewählte Zielwerte im Rahmen der vorliegenden Arbeit.....	15
Tabelle 7: Eingesetzte Ersatzrohstoffgruppen für die Herstellung von Zementklinker .....	25
Tabelle 8: Liste der potentiellen Ersatzrohstoffe mit einem Kalkstandard >100 ...	31
Tabelle 9: Bildung der Ausgangsmatrix A .....	33
Tabelle 10: Vervollständigung der Koeffizientenmatrix A und Lösungsvektor b ...	34
Tabelle 11: Zusammensetzung des „Raw Mix 01“ .....	35
Tabelle 12: Zusammensetzung des „Raw Mix 02“ .....	35
Tabelle 13: Zusammensetzung des „Raw Mix 03“ .....	38
Tabelle 14: Zusammensetzung des „Raw Mix 04“ .....	38
Tabelle 15: Zusammensetzung des „Raw Mix 05“ .....	38
Tabelle 16: Zusammensetzung des „Raw Mix 06“ .....	39
Tabelle 17: Zusammensetzung des „Raw Mix 07“ .....	39
Tabelle 18: Zusammensetzung des „Raw Mix 08“ .....	40
Tabelle 19: Zusammensetzung des „Raw Mix 09“ .....	41
Tabelle 20: Zusammensetzung des „Raw Mix 10“ .....	41
Tabelle 21: Zusammensetzung des „Raw Mix 11“ .....	42
Tabelle 22: Zusammensetzung des „Raw Mix 12“ .....	42
Tabelle 23: Zusammensetzung des „Raw Mix 13“ .....	43
Tabelle 24: Zusammensetzung des „Raw Mix 14“ .....	43
Tabelle 25: Zusammensetzung des „Raw Mix 15“ .....	44
Tabelle 26: Zusammensetzung des „Rax Mix 16“ .....	44
Tabelle 27: Berechnung der theoretischen Ausgangsprobe vor dem Glühen .....	46

Tabelle 28: Vergleich der Analyseergebnisse der geglähten und ungeglähten Probe 7 und dessen Ergebnisunschärfe .....	47
Tabelle 29: Vergleichende Betrachtung erzielter Messergebnisse .....	54
Tabelle 30: Aufstellung der Transportkosten der Rohstoffkomponenten .....	76
Tabelle 31: Aufstellung der Transportkosten für die Zementdisposition .....	77
Tabelle 32: Gesamttransportkosten für unterschiedlichen Szenarien .....	78

---

## 11 Abkürzungsverzeichnis

---

AR	Alumina ratio
AWG	Abfallwirtschaftsgesetz
DVO	Deponieverordnung
GV	Glühverlust
IPC	Induktiv gekoppeltes Plasma
KSt	Kalkstandard
LOI	Loss of ignition
LSF	Lime saturation factor
MinroG	Mineralrohstoffgesetz
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
PZ	Portlandzement
PZ	Portlandzement
SG	Sulfatisierungsgrad
SM	Silikatmodul
SR	Silica ratio
TM	Tonerdmodul
TRVA	Thermische Reststoffverwertungsanlage
U. S. P.	Unique selling proposition

---

## Anhang Inhaltsverzeichnis

---

Anhang 1: Chemische Anforderungen, definiert als charakteristische Werte .....	III
Anhang 2: Berechnung des theoretischen Wärmebedarfs (reale Reaktionsenthalpie) aus der Klinkeranalyse (Quelle: Keil 2014, S. 338) .....	IV
Anhang 3: RFA-Messergebnisse der geglühten Proben – als Oxide ausgewertet .....	V
Anhang 4: Herangehensweise zur Mischungsberechnung.....	VII
Anhang 5: Tabelle zur Mischungsberechnung (Quelle: Freimann 2014).....	VIII
Anhang 6: Rohmehlmischung 1.....	IX
Anhang 7: Rohmehlmischung 2.....	X
Anhang 8: Rohmehlmischung 3.....	XI
Anhang 9: Rohmehlmischung 4.....	XII
Anhang 10: Rohmehlmischung 5.....	XIII
Anhang 11: Rohmehlmischung 6.....	XIV
Anhang 12: Rohmehlmischung 7.....	XV
Anhang 13: Rohmehlmischung 8.....	XVI
Anhang 14: Rohmehlmischung 9.....	XVII
Anhang 15: Rohmehlmischung 10.....	XVIII
Anhang 16: Rohmehlmischung 11.....	XIX
Anhang 17: Rohmehlmischung 12.....	XX
Anhang 18: Rohmehlmischung 13.....	XXI
Anhang 19: Rohmehlmischung 14.....	XXII
Anhang 20: Rohmehlmischung 15.....	XXIII
Anhang 21: Rohmehlmischung 16.....	XXIV
Anhang 22: Talkprobe als Oxide ausgewertet. ....	XXV
Anhang 23: Talkprobe mit der Vorgabe der Talkverbindung ( $\text{Mg}[\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$ ) .....	XXV
Anhang 24: Talkprobe mit der Vorgabe der Talkverbindung auf 100% normiert ....	XXV
Anhang 25: Prüfbefund Probe 7 (Scan Nr. 101) aus dem Jahr 2012 .....	XXVI
Anhang 26: Auswertung Versuch Methodenvergleich .....	XXVII
Anhang 27: Betonmischanlage Klaus – TRVA Spital am Pyhrn .....	XXVIII
Anhang 28: Betonmischanlage Ternberg – TRVA Spital am Pyhrn.....	XXVIII
Anhang 29: Betonmischanlage Dietach – TRVA Spital am Pyhrn .....	XXIX

Anhang 30: Betonmischanlage Linz – TRVA Spital am Pyhrn.....	XXIX
Anhang 31: Betonmischanlage Spital am Pyhrn – TRVA Enns .....	XXX
Anhang 32: Betonmischanlage Klaus – TRVA Enns .....	XXX
Anhang 33: Betonmischanlage Ternberg – TRVA Enns.....	XXXI
Anhang 34: Betonmischanlage Dietach – TRVA Enns .....	XXXI
Anhang 35: Betonmischanlage Linz – TRVA Enns.....	XXXII

# Anhang

1	2	3	4	5
Eigenschaft	Prüfung nach	Zementart	Festigkeitsklasse	Anforderungen <sup>a</sup>
Glühverlust	EN 196-2	CEM I CEM III	alle	≤ 5,0 %
Unlöslicher Rückstand	EN 196-2 <sup>b</sup>	CEM I CEM III	alle	≤ 5,0 %
Sulfatgehalt (als SO <sub>3</sub> )	EN 196-2	CEM I CEM II <sup>c</sup> CEM IV CEM V	32,5 N 32,5 R 42,5 N	≤ 3,5 %
			42,5 R 52,5 N 52,5 R	≤ 4,0 %
		CEM III <sup>d</sup>	alle	
Chloridgehalt	EN 196-2	alle <sup>e</sup>	alle	≤ 0,10 % <sup>f</sup>
Puzzolanität	EN 196-5	CEM IV	alle	muss die Prüfung bestehen

<sup>a</sup> Die Anforderungen sind als Massenanteil in Prozent des gebrauchsfertigen Zements angegeben.

<sup>b</sup> Bestimmung des in Salzsäure und Natriumcarbonat unlöslichen Rückstands.

<sup>c</sup> Zementarten CEM II/B-T und CEM II/B-M mit einem T-Gehalt > 20 % dürfen bis zu 4,5 % Sulfat (als SO<sub>3</sub>) für alle Festigkeitsklassen enthalten.

<sup>d</sup> Zementart CEM III/C darf bis zu 4,5 % Sulfat enthalten.

<sup>e</sup> Zementart CEM III darf mehr als 0,10 % Chlorid enthalten, aber in dieser Fall muss der maximale Chloridgehalt auf der Verpackung und/oder auf dem Lieferschein angegeben werden.

<sup>f</sup> Für Spannbetonanwendungen können Zemente nach einer niedrigeren Anforderung hergestellt werden. In diesem Fall ist der Wert von 0,10 % durch den niedrigeren Wert zu ersetzen, der auf dem Lieferschein anzugeben ist.

**Anhang 1: Chemische Anforderungen, definiert als charakteristische Werte  
(Quelle: ÖNORM EN 197-1:2011, S. 20)**

Chemische Analyse	Faktoren nach ZUR STRASSEN	kcal/kg	100 kg Klinker sind entstanden aus	
			Rohmehl mit kg	unter Abgabe von kg
CaO 66,8	+7,65	+511	119,3 CaCO <sub>3</sub>	52,5 CO <sub>2</sub>
MgO 1,2	+6,48	+ 8	2,5 MgCO <sub>3</sub>	1,3 CO <sub>2</sub>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 5,9	+4,11	+ 24	8,0 Kaolin	z. T. 2,1 H <sub>2</sub> O
	Se.	+543		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2,3	-0,59	- 1	2,3 Eisenoxidzusatz	
			14,5 aus Gestein (nicht als Kaolinit)	
SiO <sub>2</sub> 22,5	-5,12	-115	7,0 aus Kaolinit	
			1,0 Quarz-Zusatz	
Se. 98,7		+427	154,6 kg Rohmehl	
Alk. 1,3 als Sulf.				
Se. 100,0				

Anhang 2: Berechnung des theoretischen Wärmebedarfs (reale Reaktionsenthalpie) aus der Klinkeranalyse (Quelle: Keil 2014, S. 338)

Lfd.Nr (SCAN)	Probe	KSt II	SM	TM	Sum	LOI	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	Mn2O3	TiO2	K2O	Na2O	SO3	P2O5	Cl	Rest
122 (2013)	R1	15,60	9,33	0,94	80,60%	12,31%	39,98%	2,07%	2,22%	18,07%	3,68%	0,48%	0,14%	0,52%	0,17%	0,45%	0,06%	0,01%	0,44%
122 (2013)	R2	10,03	12,55	2,62	77,50%	7,01%	48,65%	2,81%	1,07%	14,07%	1,24%	0,27%	0,15%	0,85%	0,37%	0,45%	0,05%		0,52%
116 (2013)	R3	8,81	1,36	1,13	82,70%	19,54%	28,08%	10,95%	9,66%	8,62%	2,17%	0,19%	0,65%	1,28%	0,21%	0,72%	0,14%		0,48%
076 (2013)	R4	28,61	1,24	0,52	86,50%	21,11%	19,99%	5,51%	10,56%	19,84%	5,02%	1,49%	0,38%	0,68%	0,29%	0,70%	0,32%	0,01%	0,60%
120 (2013)	R5	6,85	12,94	1,77	78,60%	8,36%	51,10%	2,53%	1,42%	10,07%	2,92%	0,17%	0,10%	0,92%	0,33%	0,16%	0,06%		0,46%
121 (2013)	R6	6,38	11,85	1,45	78,00%	7,65%	51,56%	2,58%	1,78%	9,47%	2,71%	0,19%	0,11%	0,97%	0,32%	0,16%	0,06%		0,44%
165 (2013)	R7	5,75	12,08	1,64	78,00%	6,70%	53,34%	2,74%	1,68%	8,84%	2,29%	0,19%	0,11%	1,02%	0,35%	0,16%	0,05%		0,53%
105 (2014)	R8	5,70	13,10	1,74	78,40%	7,29%	53,69%	2,60%	1,50%	8,79%	2,26%	0,15%	0,10%	0,97%	0,32%	0,16%	0,05%		0,51%
195 (2013)	R9	21,87	1,03	0,37	88,20%	24,06%	20,53%	5,40%	14,53%	16,03%	3,06%	1,12%	0,38%	0,91%	0,36%	0,67%	0,30%	0,01%	0,83%
194 (2013)	R10	2,92	13,44	2,43	75,30%	3,97%	58,52%	3,08%	1,27%	4,92%	1,13%	0,03%	0,13%	1,03%	0,51%	0,15%	0,04%		0,51%
077	1	34,64	2,81	1,46	91,20%	26,20%	19,88%	4,19%	2,88%	21,64%	2,62%	0,10%	0,21%	0,95%	0,39%	10,53%	1,36%	0,03%	0,23%
099 (143)	2	10,81	3,21	2,54	90,70%	13,67%	39,70%	8,89%	3,50%	13,39%	4,03%	0,11%	0,44%	2,24%	0,77%	2,60%	0,14%	0,05%	1,19%
099 (143)	3	11,82	3,10	2,46	89,90%	14,19%	37,35%	8,58%	3,48%	13,82%	4,34%	0,10%	0,45%	2,14%	0,74%	2,07%	0,12%	0,08%	2,45%
099 (143)	4	13,79	3,20	2,34	91,40%	15,35%	36,22%	7,94%	3,39%	15,58%	4,02%	0,09%	0,38%	2,06%	0,64%	3,30%	0,11%	0,06%	2,26%
100	5	6,74	2,64	2,74	91,30%	13,08%	44,33%	12,33%	4,49%	9,54%	3,55%	0,12%	0,69%	1,87%	0,82%	0,10%	0,23%		0,15%
101 (146)	6	75,23	5,52	1,58	95,60%	32,94%	15,67%	1,74%	1,10%	35,09%	8,14%	0,07%	0,09%	0,24%	0,08%	0,31%	0,04%	0,01%	0,08%
101 (147)	7	71,96	5,25	1,75	95,30%	32,27%	16,18%	1,96%	1,12%	34,79%	8,11%	0,07%	0,11%	0,28%	0,13%	0,13%	0,05%	0,02%	0,08%
103	8	3,31	3,00	3,61	82,20%	6,83%	47,21%	12,33%	3,42%	4,94%	1,85%	0,08%	0,57%	3,07%	1,27%	0,13%	0,32%	0,01%	0,19%
103	9	3,12	3,22	4,15	86,20%	6,23%	51,29%	12,83%	3,09%	5,01%	1,70%	0,07%	0,51%	3,30%	1,52%	0,13%	0,31%	0,01%	0,20%
106 (166)	10	12,08	4,02	2,69	86,80%	11,01%	41,92%	7,61%	2,83%	15,49%	4,89%	0,10%	0,38%	1,38%	0,63%	0,23%	0,21%		0,13%
107 (148)	11	33,32	1,89	1,66	95,10%	28,26%	20,34%	6,73%	4,06%	22,50%	7,09%	0,08%	0,41%	0,86%	0,36%	3,84%	0,24%	0,03%	0,31%
108	12	14,66	3,36	2,29	84,70%	6,29%	34,13%	7,06%	3,09%	15,52%	3,76%	0,09%	0,57%	1,09%	2,76%	2,05%	0,83%	0,50%	6,97%
109	13	37,63	2,21	1,56	96,90%	30,37%	20,09%	5,55%	3,56%	24,50%	10,91%	0,06%	0,28%	0,76%	0,26%	0,26%	0,10%	0,02%	0,19%
110 (144)	14	8,96	3,45	2,71	89,00%	12,54%	44,07%	9,34%	3,45%	12,24%	3,96%	0,09%	0,50%	1,60%	0,79%	0,13%	0,17%	0,00%	0,14%
110 (144)	15	8,78	3,41	2,78	89,60%	13,43%	43,78%	9,45%	3,40%	11,94%	4,30%	0,09%	0,49%	1,56%	0,76%	0,13%	0,16%		0,11%
117	16	26,77	2,96	0,91	92,60%	14,80%	30,92%	4,97%	5,47%	25,70%	6,69%	1,18%	0,29%	0,72%	0,34%	0,94%	0,21%		0,35%
118	17	26,53	2,99	0,92	93,60%	15,10%	31,32%	5,03%	5,46%	25,78%	6,84%	1,15%	0,29%	0,71%	0,34%	0,98%	0,23%	0,01%	0,37%
119	18	24,31	3,10	0,84	93,50%	14,91%	32,56%	4,80%	5,71%	24,44%	6,92%	1,24%	0,28%	0,70%	0,36%	0,98%	0,22%		0,38%
120	19	26,78	3,01	0,92	93,30%	15,37%	31,06%	4,96%	5,38%	25,79%	6,64%	1,18%	0,30%	0,71%	0,34%	0,97%	0,21%	0,01%	0,39%
124	20	28,88	3,77	1,21	92,70%	21,44%	28,26%	4,10%	3,40%	24,89%	7,99%	0,24%	0,20%	0,59%	0,28%	0,38%	0,12%	0,01%	0,80%
125	21	20,33	3,12	1,13	89,80%	14,09%	34,34%	5,84%	5,17%	21,63%	4,63%	0,92%	0,28%	1,05%	0,56%	0,73%	0,23%	0,01%	0,32%
125	22	11,47	3,63	2,02	88,90%	11,87%	42,47%	7,83%	3,88%	14,99%	3,72%	0,47%	0,37%	1,45%	0,79%	0,61%	0,25%		0,21%
125	23	11,88	4,15	2,21	86,00%	9,85%	42,58%	7,07%	3,20%	15,40%	3,76%	0,14%	0,32%	1,31%	1,10%	0,87%	0,21%	0,01%	0,18%
125	24	29,81	2,12	0,77	90,40%	11,95%	28,58%	5,87%	7,62%	27,40%	4,69%	1,52%	0,32%	0,67%	0,48%	0,50%	0,24%	0,01%	0,55%
165	25	27,91	4,52	1,75	92,10%	21,33%	29,11%	4,10%	2,34%	24,52%	8,44%	0,11%	0,18%	0,66%	0,37%	0,66%	0,10%	0,02%	0,17%
176	26	45,71	3,19	1,75	93,40%	28,24%	19,14%	3,83%	2,18%	27,21%	6,08%	0,05%	0,19%	0,55%	0,71%	0,50%	0,11%	0,03%	4,57%
177	27	203,86	2,56	1,89	93,30%	34,37%	5,75%	1,47%	0,78%	37,39%	12,77%	0,03%	0,07%	0,19%	0,09%	0,09%	0,03%	0,01%	0,28%

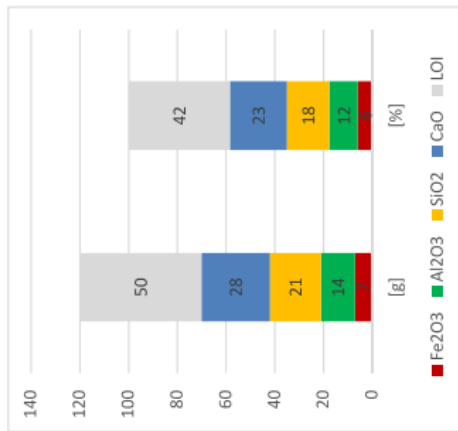
Anhang 3: RFA-Messergebnisse der geglähten Proben – als Oxide ausgewertet



Lfd.Nr (SCAN)	Probe	Kst II	SM	TM	Sum	LOI	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	Mn2O3	TiO2	K2O	Na2O	SO3	P2O5	Cl	Rest
183		22,94	1,83	1,35	94,30%	25,29%	24,71%	7,76%	5,74%	18,83%	7,42%	0,14%	0,42%	0,84%	0,54%	0,68%	0,24%	0,09%	1,61%
183		22,56	1,83	1,35	94,60%	26,61%	24,58%	7,70%	5,71%	18,41%	7,06%	0,14%	0,43%	0,92%	0,59%	0,67%	0,22%	0,07%	1,49%
183		22,13	1,78	1,32	93,70%	27,21%	24,07%	7,70%	5,85%	17,77%	6,54%	0,14%	0,43%	0,89%	0,58%	0,61%	0,24%	0,07%	1,60%
183		22,59	1,94	1,48	94,60%	26,52%	24,90%	7,65%	5,17%	18,55%	7,37%	0,13%	0,41%	0,92%	0,56%	0,66%	0,23%	0,08%	1,47%
183		22,94	1,62	1,02	93,70%	25,65%	23,36%	7,28%	7,13%	18,04%	7,32%	0,17%	0,44%	0,78%	0,59%	0,71%	0,25%	0,09%	1,88%
207		164,14	2,79	1,02	96,50%	37,51%	7,13%	1,29%	1,27%	36,64%	11,81%	0,19%	0,07%	0,21%	0,07%	0,14%	0,04%	0,02%	0,12%
208		170,27	2,63	1,02	97,00%	37,61%	6,89%	1,32%	1,29%	36,96%	12,09%	0,19%	0,07%	0,19%	0,07%	0,13%	0,04%	0,01%	0,13%
209		171,04	2,52	1,02	97,40%	37,57%	6,80%	1,36%	1,34%	36,83%	12,66%	0,19%	0,07%	0,16%	0,05%	0,15%	0,05%	0,02%	0,14%
210		163,91	2,59	1,04	97,20%	37,20%	7,11%	1,40%	1,35%	36,77%	12,48%	0,21%	0,07%	0,17%	0,06%	0,18%	0,05%	0,01%	0,14%
212		17,00	3,52	2,42	87,60%	13,28%	37,75%	7,59%	3,14%	19,84%	3,00%	0,08%	0,43%	1,26%	0,54%	0,39%	0,13%		0,15%
212		25,84	3,27	2,82	93,10%	23,28%	29,16%	6,59%	2,34%	23,50%	5,74%	0,05%	0,33%	1,17%	0,45%	0,30%	0,10%	0,01%	0,10%
212		16,91	4,02	2,25	88,10%	17,02%	37,04%	6,39%	2,84%	19,12%	3,20%	0,08%	0,34%	1,13%	0,43%	0,27%	0,10%		0,14%
212		9,33	4,04	2,89	86,90%	12,08%	44,95%	8,27%	2,86%	12,82%	2,49%	0,06%	0,42%	1,51%	0,71%	0,49%	0,12%		0,13%
212		33,04	3,16	2,56	90,20%	18,49%	27,43%	6,25%	2,44%	28,34%	5,05%	0,06%	0,36%	0,94%	0,40%	0,29%	0,07%		0,08%
212		25,60	3,67	2,72	93,40%	23,43%	29,53%	5,88%	2,17%	23,30%	7,10%	0,06%	0,29%	0,85%	0,36%	0,23%	0,10%	0,01%	0,10%
212		10,21	3,88	3,04	88,10%	13,40%	43,91%	8,51%	2,80%	13,77%	2,26%	0,05%	0,38%	1,61%	0,69%	0,46%	0,14%		0,13%
212		31,48	3,67	2,57	92,40%	23,47%	27,19%	5,33%	2,07%	26,37%	5,89%	0,05%	0,27%	0,93%	0,38%	0,29%	0,07%	0,02%	0,06%
212		24,68	3,53	2,67	92,20%	21,77%	30,52%	6,29%	2,35%	23,30%	5,48%	0,06%	0,32%	1,05%	0,45%	0,40%	0,10%	0,01%	0,11%
	Kalkstein Feinsand Präffeboden	2199,05	0,11	16,00	100,01%	40,00%	0,33%	2,72%	0,17%	93,33%	1,27%	0,00%	0,00%	0,05%	0,03%	0,05%	0,02%	0,02%	2,02%
	Kalkschlamm Ground Unit	818,13	0,72	3,70	100,00%	39,70%	2,47%	2,70%	0,73%	86,53%	6,62%	0,07%	0,05%	0,07%	0,38%	0,23%	0,02%	0,03%	0,10%
	Schreddersand TBS	15,22	0,69	0,29	99,99%	21,30%	26,68%	8,60%	29,99%	15,88%	4,14%	0,61%	1,21%	0,91%	3,14%	2,13%	0,64%	0,55%	5,51%
	Aluschlacke Probe A	5,27	0,16	12,22	99,35%	14,50%	10,85%	64,38%	5,27%	5,79%	4,81%	0,39%	0,21%	1,49%	2,02%	0,40%	0,08%	1,14%	2,52%
	Aluschlacke gesamt	5,11	0,26	14,00	96,51%	19,00%	13,30%	46,87%	3,35%	4,84%	5,11%	0,66%	0,27%	0,62%	0,66%	0,16%	0,08%	0,03%	1,56%
	Aluschlacke nicht magnetisch	5,01	0,26	14,89	96,07%	20,00%	12,99%	46,23%	3,10%	4,66%	4,99%	0,64%	0,27%	0,61%	0,62%	0,16%	0,07%	0,03%	1,72%
	Aluschlacke magnetisch	4,46	0,22	5,50	99,86%	17,30%	12,46%	47,10%	8,57%	4,29%	5,38%	0,88%	0,31%	0,71%	0,85%	0,14%	0,10%	0,02%	1,76%
	Filterkuchen Klaus	150,70	1,51	3,18	98,98%	40,80%	6,63%	3,34%	1,05%	34,94%	11,41%	0,06%	0,09%	0,50%	0,04%	0,05%	0,02%		0,06%
	Lehm Hargelsberg	0,73	2,39	2,46	100,00%	6,30%	59,47%	17,67%	7,18%	1,40%	1,98%	0,12%	0,83%	2,61%	1,49%	0,00%	0,21%		0,74%
	Cinerit (Flugasche)	143,55	1,44	10,60	96,34%		13,22%	8,38%	0,79%	68,06%	2,52%	0,13%	0,40%	0,36%	0,26%	1,05%	0,32%	0,38%	0,49%
	Bypassmehl (Nebenprodukt Zementherzeugung)	143,72	2,11	2,25	94,66%		12,67%	4,16%	1,85%	59,78%	2,64%	0,17%	0,20%	5,71%	0,57%	3,57%	0,17%	1,88%	1,28%
	Zyklonsand Loja	24,01	2,16	1,19	90,91%		30,51%	7,67%	6,46%	23,70%	16,90%	0,37%	0,86%	1,62%	1,07%	1,25%	0,28%	0,01%	0,19%
	Betonrecycling	45,82	4,14	2,08	93,36%		30,53%	4,98%	2,40%	42,58%	9,98%	0,24%	0,25%	0,60%	0,48%	0,99%	0,11%	0,04%	0,18%
	Ziegelbruch	2,45	2,63	2,69	88,45%		55,36%	15,32%	5,70%	4,33%	2,42%	0,29%	0,86%	2,54%	1,20%	0,05%	0,17%	0,00%	0,21%

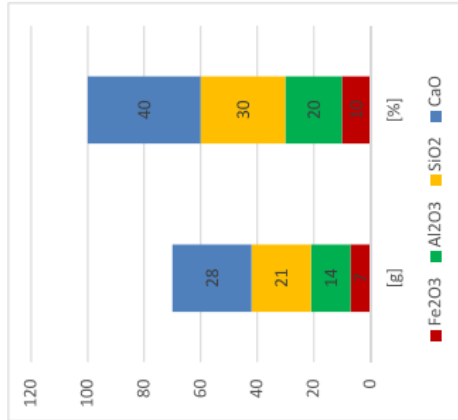
**Ausgangsprobe**  
ungeglühter Zustand  
Mittels LOI rückgerechnet  
Annahme: Elemente sind als Oxide gebunden

	[g]	[%]
LOI	50	42
CaO	28	23
SiO2	21	18
Al2O3	14	12
Fe2O3	7	6
	<b>120</b>	<b>100</b>



**Geglühte Probe**  
Messung mittels RFA und  
Auswertung der Elemente als  
Oxide

	[g]	[%]
CaO	28	40
SiO2	21	30
Al2O3	14	20
Fe2O3	7	10
	<b>70</b>	<b>100</b>



**Quelle A** berechnet auf Basis der Module, dass wir X%  
von der Probe im **GEGLÜHTEN ZUSTAND** brauchen.  
**10 %**  
und rechnet dann auf die Ausgangsprobe zurück

	Geglühte Probe		ungegl. Probe	
	[g]	[%]	[g]	[%]
CaO	2,80	4,00	2,80	2,33
SiO2	2,10	3,00	2,10	1,75
Al2O3	1,40	2,00	1,40	1,17
Fe2O3	0,70	1,00	0,70	0,58
	<b>7,00</b>	<b>10,00</b>	<b>7,00</b>	<b>5,83</b>

**Quelle B** berechnet auf Basis der Module, dass wir X%  
von der Probe im **UNGEGLÜHTEN ZUSTAND** brauchen.  
**10 %**

	ungegl. Probe	
	[g]	[%]
CaO	2,80	2,33
SiO2	2,10	1,75
Al2O3	1,40	1,17
Fe2O3	0,70	0,58
	<b>7,00</b>	<b>5,83</b>

	Ausgangs- probe	geglühte Probe
KST II	35,06	35,06
SM	1,00	1,00
TM	2,00	2,00

gemessene Werte
festgelegte Werte
berechnete Werte

#### Anhang 4: Herangehensweise zur Mischungsrechnung

Festgelegte Zielwerte

KSt II	0,97
SM	2,35
TM	1,8

RAW MIX 13

Werte der Ausgangsprobe (Raw mix with LOI)

Probe	X2	37	Z	R9	total mix
%ratio	61,78	30,82	0,73	6,67	100,00
LOI	39,70	13,28	13,67	24,06	30,32
SiO2	1,49	32,74	34,27	15,59	12,30
Al2O3	1,63	6,58	7,67	4,10	3,36
Fe2O3	0,44	2,72	3,02	11,03	1,87
CaO	52,18	17,20	11,56	12,17	38,43
MgO	3,99	2,60	3,48	2,33	3,45
Mn2O3	0,04	0,07	0,10	0,85	0,11
TiO2	0,03	0,37	0,38	0,29	0,15
K2O	0,04	1,09	1,93	0,69	0,42
Na2O	0,23	0,47	0,66	0,28	0,31
SO3	0,14	0,34	2,24	0,51	0,24
P2O5	0,01	0,11	0,12	0,23	0,06
Cl	0,02	0,00	0,04	0,01	0,01
Rest	100,00	77,73	80,17	72,77	8,95
Summe					100,00

Geglühte Proben (LOI free)

Probe	X2	37	Z	R9	total mix
%ratio	53,47	38,35	0,91	7,27	100,00
SiO2	2,47	37,75	39,70	20,53	17,65
Al2O3	2,70	7,59	8,89	5,40	4,83
Fe2O3	0,73	3,14	3,50	14,53	2,68
CaO	86,53	19,84	13,39	16,03	55,16
MgO	6,62	3,00	4,03	3,06	4,95
Mn2O3	0,07	0,08	0,11	1,12	0,15
TiO2	0,05	0,43	0,44	0,38	0,22
K2O	0,07	1,26	2,24	0,91	0,61
Na2O	0,38	0,54	0,77	0,36	0,45
SO3	0,23	0,39	2,60	0,67	0,35
P2O5	0,02	0,13	0,14	0,30	0,08
Cl	0,03	0,00	0,05	0,01	0,02
Rest	0,10	0,15	1,19	0,83	12,85
Summe	100,00	74,32	77,03	64,14	100,00

Ergebnis: Moduli und Klinkerphasen

Moduli	Wert	zul. Bereich
KSt II	0,97	94-98
SM	2,35	2,35-2,75
TM	1,80	1,4-1,8
C3S	54,1	45-65
C2S	10,1	10-30
C3A	8,3	5-15
C4AF	8,2	5-12
Theor. WV	381,8	kcal/kg
S/A	0,24	(0,8 - 1,2)
LP	23	(24 - 28)

Theor. Wärmebedarf  
Alkalisulfat  
Liquide Phase (Lea)

%ratio 88,67 44,23 1,05 9,57 143,52

16450,6 Die Determinante der Matrix A ist ungleich null--> Rechnung korrekt

Matrix A				
x	y	z	w	
1	1	1	1	1
0	-76,27	93,36	106,81	55,07
0	5,59	-12,53	-10,59	26,30
0	-1,39	-1,94	-2,59	20,76

Inverse Matrix				
0,534680296	-0,00419154	0,017060907	-0,03625456	
0,383544211	-0,02027284	-0,256017361	0,3596715	
0,009077141	0,023688734	0,232759388	-0,35818185	
0,072898352	0,000775643	0,006197066	0,03476491	

Probe:				
x	0,5347	53,47		
y	0,3835	38,35		
z	0,0091	0,91		
w	0,0727	7,27		
		100,00		

Probe:				
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	1	0

1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	1	0

Berechnung d. theor. Wärmebedarfs [kcal/kg]					
	Al2O3	MgO	CaO	SiO2	Fe2O3
Oxyd-Faktor	4,11	6,48	7,646	-5,116	-0,59
Analyse Klinker	4,83	4,95	55,16	17,65	2,68
<b>Theoretischer Wärmebedarf</b>	<b>19,85</b>	<b>32,07</b>	<b>421,77</b>	<b>-90,31</b>	<b>-1,58</b>

Anhang 5: Tabelle zur Mischungsberechnung (Quelle: Freimann 2014)

Festgelegte Zielwerte

KSt II	0,95
SM	2,55
AM	1,6

RAW MIX 01

Werte der Ausgangsprobe (Raw mix with LOI)

Probe	27	6	16	13	total mix
%ratio	63,86	8,33	2,08	25,73	100,00
L.O.I	34,37	32,94	14,80	30,37	32,82
SiO2	3,78	10,51	26,34	13,99	7,43
Al2O3	0,96	1,17	4,24	3,86	1,79
Fe2O3	0,51	0,74	4,66	2,48	1,12
CaO	24,54	23,53	21,90	17,06	22,48
MgO	8,38	5,46	5,70	7,60	7,88
Mn2O3	0,02	0,04	1,01	0,04	0,05
TiO2	0,04	0,06	0,25	0,19	0,09
K2O	0,12	0,16	0,62	0,53	0,24
Na2O	0,06	0,05	0,29	0,18	0,09
SO3	0,06	0,21	0,80	0,18	0,12
P2O5	0,02	0,03	0,18	0,07	0,03
Cl	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
Rest	0,18	0,05	0,30	0,13	25,85
Summe	73,05	74,96	81,08	76,69	100,00

Geglühte Proben (LOI free)

Probe	27	6	16	13	total mix
%ratio	62,38	8,32	2,63	26,67	100,00
SiO2	5,75	15,67	30,92	20,09	11,06
Al2O3	1,47	1,74	4,97	5,55	2,67
Fe2O3	0,78	1,10	5,47	3,56	1,67
CaO	37,39	35,09	25,70	24,50	33,45
MgO	12,77	8,14	6,69	10,91	11,73
Mn2O3	0,03	0,07	1,18	0,06	0,07
TiO2	0,07	0,09	0,29	0,28	0,13
K2O	0,19	0,24	0,72	0,76	0,36
Na2O	0,09	0,08	0,34	0,26	0,14
SO3	0,09	0,31	0,94	0,26	0,17
P2O5	0,03	0,04	0,21	0,10	0,05
Cl	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01
Rest	0,28	0,08	0,35	0,19	38,48
Summe	58,93	62,66	77,80	66,53	100,00

Ergebnis: Moduli und Klinkerphasen

Moduli	Wert	zul. Bereich	
KSt II	0,95	94-98	
SM	2,55	2,35-2,75	
AM	1,60	1,4-1,8	
C3S	31,7	45-65	
C2S	7,9	10-30	
C3A	4,3	5-15	
C4AF	5,1	5-12	
Theor. WV	285,2	kcal/kg	Theor. Wärmebedarf
S/A	0,25	(0,8 - 1,2)	Alkalisulfat
LP	14	(24 - 28)	Liquide Phase (Lea)

Anhang 6: Rohmehlmischung 1

Festgelegte Zielwerte

KSt II	0,98
SM	2,75
AM	1,6

RAW MIX 02

Werte der Ausgangsprobe (Raw mix with LOI)

Probe	27	6	16	13	total mix
%ratio	61,97	15,67	2,13	20,23	100,00
L.O.I	34,37	32,94	14,80	30,37	32,92
SiO2	3,78	10,51	26,34	13,99	7,38
Al2O3	0,96	1,17	4,24	3,86	1,65
Fe2O3	0,51	0,74	4,66	2,48	1,03
CaO	24,54	23,53	21,90	17,06	22,81
MgO	8,38	5,46	5,70	7,60	7,71
Mn2O3	0,02	0,04	1,01	0,04	0,05
TiO2	0,04	0,06	0,25	0,19	0,08
K2O	0,12	0,16	0,62	0,53	0,22
Na2O	0,06	0,05	0,29	0,18	0,09
SO3	0,06	0,21	0,80	0,18	0,12
P2O5	0,02	0,03	0,18	0,07	0,03
Cl	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
Rest	0,18	0,05	0,30	0,13	25,90
Summe	73,05	74,96	81,08	76,69	100,00

Geglühte Proben (LOI free)

Probe	27	6	16	13	total mix
%ratio	60,63	15,66	2,71	21,00	100,00
SiO2	5,75	15,67	30,92	20,09	11,00
Al2O3	1,47	1,74	4,97	5,55	2,46
Fe2O3	0,78	1,10	5,47	3,56	1,54
CaO	37,39	35,09	25,70	24,50	34,01
MgO	12,77	8,14	6,69	10,91	11,49
Mn2O3	0,03	0,07	1,18	0,06	0,07
TiO2	0,07	0,09	0,29	0,28	0,12
K2O	0,19	0,24	0,72	0,76	0,33
Na2O	0,09	0,08	0,34	0,26	0,13
SO3	0,09	0,31	0,94	0,26	0,18
P2O5	0,03	0,04	0,21	0,10	0,05
Cl	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01
Rest	0,28	0,08	0,35	0,19	38,61
Summe	58,93	62,66	77,80	66,53	100,00

Ergebnis: Moduli und Klinkerphasen

Moduli	Wert	zul. Bereich	
KSt II	0,98	94-98	
SM	2,75	2,35-2,75	
AM	1,60	1,4-1,8	
C3S	36,1	45-65	
C2S	4,5	10-30	
C3A	3,9	5-15	
C4AF	4,7	5-12	
Theor. WV	287,4	kcal/kg	Theor. Wärmebedarf
S/A	0,28	(0,8 - 1,2)	Alkalisulfat
LP	13	(24 - 28)	Liquide Phase (Lea)

Anhang 7: Rohmehlmischung 2

Festgelegte Zielwerte

KSt II	0,98
SM	2,5
AM	1,8

RAW MIX 03

Werte der Ausgangsprobe (Raw mix with LOI)

Probe	X2	6	16	8	total mix
%ratio	58,27	8,35	24,19	9,19	100,00
L.O.I	39,70	32,94	14,80	6,83	30,09
SiO2	1,49	10,51	26,34	43,99	12,16
Al2O3	1,63	1,17	4,24	11,49	3,13
Fe2O3	0,44	0,74	4,66	3,18	1,74
CaO	52,18	23,53	21,90	4,60	38,09
MgO	3,99	5,46	5,70	1,72	4,32
Mn2O3	0,04	0,04	1,01	0,07	0,28
TiO2	0,03	0,06	0,25	0,53	0,13
K2O	0,04	0,16	0,62	2,86	0,45
Na2O	0,23	0,05	0,29	1,18	0,32
SO3	0,14	0,21	0,80	0,12	0,30
P2O5	0,01	0,03	0,18	0,29	0,08
Cl	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01
Rest	0,06	0,05	0,30	0,18	8,91
Summe	100,00	74,96	81,08	77,05	100,00

Geglühte Proben (LOI free)

Probe	X2	6	16	8	total mix
%ratio	50,26	8,01	29,48	12,25	100,00
SiO2	2,47	15,67	30,92	47,21	17,39
Al2O3	2,70	1,74	4,97	12,33	4,47
Fe2O3	0,73	1,10	5,47	3,42	2,48
CaO	86,53	35,09	25,70	4,94	54,48
MgO	6,62	8,14	6,69	1,85	6,18
Mn2O3	0,07	0,07	1,18	0,08	0,40
TiO2	0,05	0,09	0,29	0,57	0,19
K2O	0,07	0,24	0,72	3,07	0,64
Na2O	0,38	0,08	0,34	1,27	0,45
SO3	0,23	0,31	0,94	0,13	0,43
P2O5	0,02	0,04	0,21	0,32	0,12
Cl	0,03	0,01	0,00	0,01	0,02
Rest	0,10	0,08	0,35	0,19	12,74
Summe	100,00	62,66	77,80	75,37	100,00

Ergebnis: Moduli und Klinkerphasen

Moduli	Wert	zul. Bereich	
KSt II	0,98	94-98	
SM	2,50	2,35-2,75	
AM	1,80	1,4-1,8	
C3S	55,9	45-65	
C2S	8,0	10-30	
C3A	7,7	5-15	
C4AF	7,6	5-12	
Theor. WV	384,5	kcal/kg	Theor. Wärmebedarf
S/A	0,29	(0,8 - 1,2)	Alkalisulfat
LP	22	(24 - 28)	Liquide Phase (Lea)

Anhang 8: Rohmehlmischung 3



Festgelegte Zielwerte

KSt II	0,98
SM	2,55
AM	1,5

RAW MIX 04

Werte der Ausgangsprobe (Raw mix with LOI)

Probe	X2	40	16	1	total mix
%ratio	57,23	6,97	28,79	7,01	100,00
L.O.I	39,70	12,08	14,80	26,20	29,66
SiO2	1,49	39,52	26,34	14,67	12,22
Al2O3	1,63	7,27	4,24	3,09	2,87
Fe2O3	0,44	2,51	4,66	2,12	1,92
CaO	52,18	11,27	21,90	15,97	38,07
MgO	3,99	2,19	5,70	1,93	4,21
Mn2O3	0,04	0,05	1,01	0,08	0,32
TiO2	0,03	0,37	0,25	0,16	0,13
K2O	0,04	1,33	0,62	0,70	0,34
Na2O	0,23	0,63	0,29	0,29	0,28
SO3	0,14	0,43	0,80	7,77	0,89
P2O5	0,01	0,10	0,18	1,00	0,14
Cl	0,02	0,00	0,00	0,02	0,01
Rest	0,06	0,11	0,30	0,17	8,94
Summe	100,00	77,86	81,08	74,17	100,00

Geglühte Proben (LOI free)

Probe	X2	40	16	1	total mix
%ratio	49,07	8,71	34,87	7,36	100,00
SiO2	2,47	44,95	30,92	19,88	17,37
Al2O3	2,70	8,27	4,97	4,19	4,09
Fe2O3	0,73	2,86	5,47	2,88	2,72
CaO	86,53	12,82	25,70	21,64	54,13
MgO	6,62	2,49	6,69	2,62	5,99
Mn2O3	0,07	0,06	1,18	0,10	0,46
TiO2	0,05	0,42	0,29	0,21	0,18
K2O	0,07	1,51	0,72	0,95	0,49
Na2O	0,38	0,71	0,34	0,39	0,40
SO3	0,23	0,49	0,94	10,53	1,26
P2O5	0,02	0,12	0,21	1,36	0,19
Cl	0,03	0,00	0,00	0,03	0,02
Rest	0,10	0,13	0,35	0,23	12,71
Summe	100,00	74,82	77,80	65,00	100,00

Ergebnis: Moduli und Klinkerphasen

Moduli	Wert	zul. Bereich	
KSt II	0,98	94-98	
SM	2,55	2,35-2,75	
AM	1,50	1,4-1,8	
C3S	56,9	45-65	
C2S	7,2	10-30	
C3A	6,2	5-15	
C4AF	8,3	5-12	
Theor. WV	379,0	kcal/kg	Theor. Wärmebedarf
S/A	1,07	(0,8 - 1,2)	Alkalisulfat
LP	21	(24 - 28)	Liquide Phase (Lea)

Anhang 9: Rohmehlmischung 4

Festgelegte Zielwerte

KSt II	0,98
SM	2,55
AM	1,8

RAW MIX 05

Werte der Ausgangsprobe (Raw mix with LOI)

Probe	X2	40	16	1	total mix
%ratio	50,58	7,69	9,64	32,09	100,00
L.O.I	39,70	12,08	14,80	26,20	30,84
SiO2	1,49	39,52	26,34	14,67	11,04
Al2O3	1,63	7,27	4,24	3,09	2,78
Fe2O3	0,44	2,51	4,66	2,12	1,55
CaO	52,18	11,27	21,90	15,97	34,50
MgO	3,99	2,19	5,70	1,93	3,36
Mn2O3	0,04	0,05	1,01	0,08	0,15
TiO2	0,03	0,37	0,25	0,16	0,12
K2O	0,04	1,33	0,62	0,70	0,41
Na2O	0,23	0,63	0,29	0,29	0,28
SO3	0,14	0,43	0,80	7,77	2,67
P2O5	0,01	0,10	0,18	1,00	0,35
Cl	0,02	0,00	0,00	0,02	0,02
Rest	0,06	0,11	0,30	0,17	11,94
Summe	100,00	77,86	81,08	74,17	100,00

Geglühte Proben (LOI free)

Probe	X2	40	16	1	total mix
%ratio	44,11	9,78	11,88	34,24	100,00
SiO2	2,47	44,95	30,92	19,88	15,96
Al2O3	2,70	8,27	4,97	4,19	4,02
Fe2O3	0,73	2,86	5,47	2,88	2,24
CaO	86,53	12,82	25,70	21,64	49,88
MgO	6,62	2,49	6,69	2,62	4,85
Mn2O3	0,07	0,06	1,18	0,10	0,21
TiO2	0,05	0,42	0,29	0,21	0,17
K2O	0,07	1,51	0,72	0,95	0,59
Na2O	0,38	0,71	0,34	0,39	0,41
SO3	0,23	0,49	0,94	10,53	3,87
P2O5	0,02	0,12	0,21	1,36	0,51
Cl	0,03	0,00	0,00	0,03	0,02
Rest	0,10	0,13	0,35	0,23	17,26
Summe	100,00	74,82	77,80	65,00	100,00

Ergebnis: Moduli und Klinkerphasen

Moduli	Wert	zul. Bereich	
KSt II	0,98	94-98	
SM	2,55	2,35-2,75	
AM	1,80	1,4-1,8	
C3S	51,5	45-65	
C2S	7,2	10-30	
C3A	6,9	5-15	
C4AF	6,8	5-12	
Theor. WV	346,4	kcal/kg	Theor. Wärmebedarf
S/A	2,87	(0,8 - 1,2)	Alkalisulfat
LP	20	(24 - 28)	Liquide Phase (Lea)

Anhang 10: Rohmehlmischung 5



Festgelegte Zielwerte

KSt II	0,95
SM	2,55
AM	2

RAW MIX 06

Werte der Ausgangsprobe (Raw mix with LOI)

Probe	X2	40	5	1	total mix
%ratio	45,99	7,57	0,55	45,88	100,00
L.O.I	39,70	12,08	13,08	26,20	31,27
SiO2	1,49	39,52	38,53	14,67	10,62
Al2O3	1,63	7,27	10,72	3,09	2,78
Fe2O3	0,44	2,51	3,91	2,12	1,39
CaO	52,18	11,27	8,29	15,97	32,23
MgO	3,99	2,19	3,08	1,93	2,90
Mn2O3	0,04	0,05	0,10	0,08	0,06
TiO2	0,03	0,37	0,60	0,16	0,12
K2O	0,04	1,33	1,63	0,70	0,45
Na2O	0,23	0,63	0,71	0,29	0,29
SO3	0,14	0,43	0,09	7,77	3,66
P2O5	0,01	0,10	0,20	1,00	0,47
Cl	0,02	0,00	0,00	0,02	0,02
Rest	0,06	0,11	0,13	0,17	13,75
Summe	100,00	77,86	81,07	74,17	100,00

Geglühte Proben (LOI free)

Probe	X2	40	5	1	total mix
%ratio	40,35	9,69	0,70	49,26	100,00
SiO2	2,47	44,95	44,33	19,88	15,45
Al2O3	2,70	8,27	12,33	4,19	4,04
Fe2O3	0,73	2,86	4,49	2,88	2,02
CaO	86,53	12,82	9,54	21,64	46,89
MgO	6,62	2,49	3,55	2,62	4,23
Mn2O3	0,07	0,06	0,12	0,10	0,09
TiO2	0,05	0,42	0,69	0,21	0,17
K2O	0,07	1,51	1,87	0,95	0,65
Na2O	0,38	0,71	0,82	0,39	0,42
SO3	0,23	0,49	0,10	10,53	5,33
P2O5	0,02	0,12	0,23	1,36	0,69
Cl	0,03	0,00	0,00	0,03	0,03
Rest	0,10	0,13	0,15	0,23	20,00
Summe	100,00	74,82	78,22	65,00	100,00

Ergebnis: Moduli und Klinkerphasen

Moduli	Wert	zul. Bereich	
KSt II	0,95	94-98	
SM	2,55	2,35-2,75	
AM	2,00	1,4-1,8	
C3S	43,3	45-65	
C2S	11,9	10-30	
C3A	7,3	5-15	
C4AF	6,1	5-12	
Theor. WV	322,2	kcal/kg	Theor. Wärmebedarf
S/A	3,66	(0,8 - 1,2)	Alkalisulfat
LP	19	(24 - 28)	Liquide Phase (Lea)

Anhang 11: Rohmehlmischung 6

Festgelegte Zielwerte

KSt II	0,95
SM	2,35
AM	1,8

RAW MIX 07

Werte der Ausgangsprobe (Raw mix with LOI)

Probe	X1	46	X3	1	total mix
%ratio	34,38	0,13	0,21	65,28	100,00
L.O.I	40,00	0,00	21,30	26,20	30,90
SiO2	0,20	13,30	21,00	14,67	9,71
Al2O3	1,63	46,87	6,77	3,09	2,66
Fe2O3	0,10	3,35	23,60	2,12	1,48
CaO	56,00	4,84	12,50	15,97	29,71
MgO	0,76	5,11	3,26	1,93	1,54
Mn2O3	0,00	0,66	0,48	0,08	0,05
TiO2	0,00	0,27	0,95	0,16	0,11
K2O	0,03	0,62	0,72	0,70	0,47
Na2O	0,02	0,66	2,47	0,29	0,20
SO3	0,03	0,16	1,68	7,77	5,09
P2O5	0,01	0,08	0,50	1,00	0,66
Cl	0,01	0,03	0,43	0,02	0,02
Rest	1,21	1,56	4,34	0,17	17,43
Summe	100,01	77,51	99,99	74,17	100,00

Geglühte Proben (LOI free)

Probe	X1	46	X3	1	total mix
%ratio	29,85	0,19	0,24	69,72	100,00
SiO2	0,33	13,30	26,68	19,88	14,05
Al2O3	2,72	46,87	8,60	4,19	3,84
Fe2O3	0,17	3,35	29,99	2,88	2,13
CaO	93,33	4,84	15,88	21,64	42,99
MgO	1,27	5,11	4,14	2,62	2,22
Mn2O3	0,00	0,66	0,61	0,10	0,08
TiO2	0,00	0,27	1,21	0,21	0,15
K2O	0,05	0,62	0,91	0,95	0,68
Na2O	0,03	0,66	3,14	0,39	0,29
SO3	0,05	0,16	2,13	10,53	7,36
P2O5	0,02	0,08	0,64	1,36	0,96
Cl	0,02	0,03	0,55	0,03	0,03
Rest	2,02	1,56	5,51	0,23	25,22
Summe	100,01	77,51	99,99	65,00	100,00

Ergebnis: Moduli und Klinkerphasen

Moduli	Wert	zul. Bereich	
KSt II	0,95	94-98	
SM	2,35	2,35-2,75	
AM	1,80	1,4-1,8	
C3S	39,3	45-65	
C2S	10,8	10-30	
C3A	6,6	5-15	
C4AF	6,5	5-12	
Theor. WV	285,8	kcal/kg	Theor. Wärmebedarf
S/A	5,42	(0,8 - 1,2)	Alkalisulfat
LP	19	(24 - 28)	Liquide Phase (Lea)

Anhang 12: Rohmehlmischung 7

Festgelegte Zielwerte

KSt II	0,98
SM	2,35
AM	1,7

RAW MIX 08

Werte der Ausgangsprobe (Raw mix with LOI)

Probe	X2	46	X3	1	total mix
%ratio	39,02	0,06	0,17	60,75	100,00
L.O.I	39,70	0,00	21,30	26,20	31,44
SiO2	1,49	13,30	21,00	14,67	9,54
Al2O3	1,63	46,87	6,77	3,09	2,56
Fe2O3	0,44	3,35	23,60	2,12	1,50
CaO	52,18	4,84	12,50	15,97	30,08
MgO	3,99	5,11	3,26	1,93	2,74
Mn2O3	0,04	0,66	0,48	0,08	0,06
TiO2	0,03	0,27	0,95	0,16	0,11
K2O	0,04	0,62	0,72	0,70	0,44
Na2O	0,23	0,66	2,47	0,29	0,27
SO3	0,14	0,16	1,68	7,77	4,78
P2O5	0,01	0,08	0,50	1,00	0,61
Cl	0,02	0,03	0,43	0,02	0,02
Rest	0,06	1,56	4,34	0,17	15,84
Summe	100,00	77,51	99,99	74,17	100,00

Geglühte Proben (LOI free)

Probe	X2	46	X3	1	total mix
%ratio	34,32	0,09	0,19	65,40	100,00
SiO2	2,47	13,30	26,68	19,88	13,91
Al2O3	2,70	46,87	8,60	4,19	3,73
Fe2O3	0,73	3,35	29,99	2,88	2,19
CaO	86,53	4,84	15,88	21,64	43,88
MgO	6,62	5,11	4,14	2,62	3,99
Mn2O3	0,07	0,66	0,61	0,10	0,09
TiO2	0,05	0,27	1,21	0,21	0,16
K2O	0,07	0,62	0,91	0,95	0,64
Na2O	0,38	0,66	3,14	0,39	0,39
SO3	0,23	0,16	2,13	10,53	6,97
P2O5	0,02	0,08	0,64	1,36	0,90
Cl	0,03	0,03	0,55	0,03	0,03
Rest	0,10	1,56	5,51	0,23	23,11
Summe	100,00	77,51	99,99	65,00	100,00

Ergebnis: Moduli und Klinkerphasen

Moduli	Wert	zul. Bereich	
KSt II	0,98	94-98	
SM	2,35	2,35-2,75	
AM	1,70	1,4-1,8	
C3S	44,7	45-65	
C2S	6,4	10-30	
C3A	6,2	5-15	
C4AF	6,7	5-12	
Theor. WV	304,3	kcal/kg	Theor. Wärmebedarf
S/A	4,93	(0,8 - 1,2)	Alkalisulfat
LP	19	(24 - 28)	Liquide Phase (Lea)

Anhang 13: Rohmehlmischung 8

Festgelegte Zielwerte

KSt II	0,98
SM	2,35
AM	1,8

RAW MIX 09

Werte der Ausgangsprobe (Raw mix with LOI)

Probe	X1	X3	R10	8	total mix
%ratio	70,21	5,54	8,70	15,55	100,00
L.O.I	40,00	21,30	3,97	6,83	30,67
SiO2	0,20	21,00	56,20	43,99	13,03
Al2O3	1,63	6,77	2,96	11,49	3,56
Fe2O3	0,10	23,60	1,22	3,18	1,98
CaO	56,00	12,50	4,73	4,60	41,14
MgO	0,76	3,26	1,09	1,72	1,08
Mn2O3	0,00	0,48	0,03	0,07	0,04
TiO2	0,00	0,95	0,12	0,53	0,15
K2O	0,03	0,72	0,99	2,86	0,59
Na2O	0,02	2,47	0,49	1,18	0,38
SO3	0,03	1,68	0,15	0,12	0,15
P2O5	0,01	0,50	0,04	0,29	0,09
Cl	0,01	0,43	0,00	0,01	0,03
Rest	1,21	4,34	0,49	0,18	7,12
Summe	100,01	99,99	72,47	77,05	100,00

Geglühte Proben (LOI free)

Probe	X1	X3	R10	8	total mix
%ratio	60,77	6,29	12,05	20,89	100,00
SiO2	0,33	26,68	58,52	47,21	18,79
Al2O3	2,72	8,60	3,08	12,33	5,14
Fe2O3	0,17	29,99	1,27	3,42	2,86
CaO	93,33	15,88	4,92	4,94	59,34
MgO	1,27	4,14	1,13	1,85	1,55
Mn2O3	0,00	0,61	0,03	0,08	0,06
TiO2	0,00	1,21	0,13	0,57	0,21
K2O	0,05	0,91	1,03	3,07	0,85
Na2O	0,03	3,14	0,51	1,27	0,54
SO3	0,05	2,13	0,15	0,13	0,21
P2O5	0,02	0,64	0,04	0,32	0,12
Cl	0,02	0,55	0,00	0,01	0,05
Rest	2,02	5,51	0,51	0,19	10,27
Summe	100,01	99,99	71,33	75,37	100,00

Ergebnis: Moduli und Klinkerphasen

Moduli	Wert	zul. Bereich	
KSt II	0,98	94-98	
SM	2,35	2,35-2,75	
AM	1,80	1,4-1,8	
C3S	60,0	45-65	
C2S	8,9	10-30	
C3A	8,8	5-15	
C4AF	8,7	5-12	
Theor. WV	387,1	kcal/kg	Theor. Wärmebedarf
S/A	0,11	(0,8 - 1,2)	Alkalisulfat
LP	24	(24 - 28)	Liquide Phase (Lea)

Anhang 14: Rohmehlmischung 9

Festgelegte Zielwerte

KSt II	0,98
SM	2,75
AM	1,8

RAW MIX 10

Werte der Ausgangsprobe (Raw mix with LOI)

Probe	X2	X3	R10	8	total mix
%ratio	74,19	3,72	11,29	10,80	100,00
L.O.I	39,70	21,30	3,97	6,83	31,43
SiO2	1,49	21,00	56,20	43,99	12,98
Al2O3	1,63	6,77	2,96	11,49	3,03
Fe2O3	0,44	23,60	1,22	3,18	1,69
CaO	52,18	12,50	4,73	4,60	40,21
MgO	3,99	3,26	1,09	1,72	3,39
Mn2O3	0,04	0,48	0,03	0,07	0,06
TiO2	0,03	0,95	0,12	0,53	0,13
K2O	0,04	0,72	0,99	2,86	0,48
Na2O	0,23	2,47	0,49	1,18	0,44
SO3	0,14	1,68	0,15	0,12	0,19
P2O5	0,01	0,50	0,04	0,29	0,06
Cl	0,02	0,43	0,00	0,01	0,03
Rest	0,06	4,34	0,49	0,18	5,87
Summe	100,00	99,99	72,47	77,05	100,00

Geglühte Proben (LOI free)

Probe	X2	X3	R10	8	total mix
%ratio	65,24	4,27	15,81	14,67	100,00
SiO2	2,47	26,68	58,52	47,21	18,93
Al2O3	2,70	8,60	3,08	12,33	4,43
Fe2O3	0,73	29,99	1,27	3,42	2,46
CaO	86,53	15,88	4,92	4,94	58,63
MgO	6,62	4,14	1,13	1,85	4,95
Mn2O3	0,07	0,61	0,03	0,08	0,09
TiO2	0,05	1,21	0,13	0,57	0,19
K2O	0,07	0,91	1,03	3,07	0,70
Na2O	0,38	3,14	0,51	1,27	0,65
SO3	0,23	2,13	0,15	0,13	0,28
P2O5	0,02	0,64	0,04	0,32	0,09
Cl	0,03	0,55	0,00	0,01	0,04
Rest	0,10	5,51	0,51	0,19	8,56
Summe	100,00	99,99	71,33	75,37	100,00

Ergebnis: Moduli und Klinkerphasen

Moduli	Wert	zul. Bereich	
KSt II	0,98	94-98	
SM	2,75	2,35-2,75	
AM	1,80	1,4-1,8	
C3S	61,5	45-65	
C2S	8,2	10-30	
C3A	7,6	5-15	
C4AF	7,5	5-12	
Theor. WV	400,3	kcal/kg	Theor. Wärmebedarf
S/A	0,16	(0,8 - 1,2)	Alkalisulfat
LP	22	(24 - 28)	Liquide Phase (Lea)

Anhang 15: Rohmehlmischung 10

Festgelegte Zielwerte

KSt II	0,98
SM	2,75
AM	1,8

RAW MIX 11

Werte der Ausgangsprobe (Raw mix with LOI)

Probe	X2	X3	R10	46	total mix
%ratio	74,38	4,51	19,05	2,06	100,00
L.O.I	39,70	21,30	3,97	0,00	31,24
SiO2	1,49	21,00	56,20	13,30	13,04
Al2O3	1,63	6,77	2,96	46,87	3,05
Fe2O3	0,44	23,60	1,22	3,35	1,69
CaO	52,18	12,50	4,73	4,84	40,37
MgO	3,99	3,26	1,09	5,11	3,43
Mn2O3	0,04	0,48	0,03	0,66	0,07
TiO2	0,03	0,95	0,12	0,27	0,09
K2O	0,04	0,72	0,99	0,62	0,27
Na2O	0,23	2,47	0,49	0,66	0,39
SO3	0,14	1,68	0,15	0,16	0,21
P2O5	0,01	0,50	0,04	0,08	0,04
Cl	0,02	0,43	0,00	0,03	0,03
Rest	0,06	4,34	0,49	1,56	6,07
Summe	100,00	99,99	72,47	77,51	100,00

Geglühte Proben (LOI free)

Probe	X2	X3	R10	46	total mix
%ratio	65,23	5,16	26,61	3,00	100,00
SiO2	2,47	26,68	58,52	13,30	18,96
Al2O3	2,70	8,60	3,08	46,87	4,43
Fe2O3	0,73	29,99	1,27	3,35	2,46
CaO	86,53	15,88	4,92	4,84	58,72
MgO	6,62	4,14	1,13	5,11	4,99
Mn2O3	0,07	0,61	0,03	0,66	0,11
TiO2	0,05	1,21	0,13	0,27	0,14
K2O	0,07	0,91	1,03	0,62	0,39
Na2O	0,38	3,14	0,51	0,66	0,56
SO3	0,23	2,13	0,15	0,16	0,31
P2O5	0,02	0,64	0,04	0,08	0,06
Cl	0,03	0,55	0,00	0,03	0,05
Rest	0,10	5,51	0,51	1,56	8,84
Summe	100,00	99,99	71,33	77,51	100,00

Ergebnis: Moduli und Klinkerphasen

Moduli	Wert	zul. Bereich	
KSt II	0,98	94-98	
SM	2,75	2,35-2,75	
AM	1,80	1,4-1,8	
C3S	61,6	45-65	
C2S	8,2	10-30	
C3A	7,6	5-15	
C4AF	7,5	5-12	
Theor. WV	401,0	kcal/kg	Theor. Wärmebedarf
S/A	0,26	(0,8 - 1,2)	Alkalisulfat
LP	21	(24 - 28)	Liquide Phase (Lea)

Anhang 16: Rohmehlmischung 11

Festgelegte Zielwerte

KSt II	0,95
SM	2,35
AM	1,8

RAW MIX 12

Werte der Ausgangsprobe (Raw mix with LOI)

Probe	X2	X3	R10	46	total mix
%ratio	72,93	5,62	18,36	3,08	100,00
L.O.I	39,70	21,30	3,97	0,00	30,88
SiO2	1,49	21,00	56,20	13,30	13,00
Al2O3	1,63	6,77	2,96	46,87	3,56
Fe2O3	0,44	23,60	1,22	3,35	1,98
CaO	52,18	12,50	4,73	4,84	39,78
MgO	3,99	3,26	1,09	5,11	3,45
Mn2O3	0,04	0,48	0,03	0,66	0,08
TiO2	0,03	0,95	0,12	0,27	0,11
K2O	0,04	0,72	0,99	0,62	0,27
Na2O	0,23	2,47	0,49	0,66	0,42
SO3	0,14	1,68	0,15	0,16	0,23
P2O5	0,01	0,50	0,04	0,08	0,05
Cl	0,02	0,43	0,00	0,03	0,04
Rest	0,06	4,34	0,49	1,56	6,17
Summe	100,00	99,99	72,47	77,51	100,00

Geglühte Proben (LOI free)

Probe	X2	X3	R10	46	total mix
%ratio	63,63	6,40	25,51	4,46	100,00
SiO2	2,47	26,68	58,52	13,30	18,80
Al2O3	2,70	8,60	3,08	46,87	5,14
Fe2O3	0,73	29,99	1,27	3,35	2,86
CaO	86,53	15,88	4,92	4,84	57,55
MgO	6,62	4,14	1,13	5,11	4,99
Mn2O3	0,07	0,61	0,03	0,66	0,12
TiO2	0,05	1,21	0,13	0,27	0,15
K2O	0,07	0,91	1,03	0,62	0,39
Na2O	0,38	3,14	0,51	0,66	0,60
SO3	0,23	2,13	0,15	0,16	0,33
P2O5	0,02	0,64	0,04	0,08	0,07
Cl	0,03	0,55	0,00	0,03	0,06
Rest	0,10	5,51	0,51	1,56	8,93
Summe	100,00	99,99	71,33	77,51	100,00

Ergebnis: Moduli und Klinkerphasen

Moduli	Wert	zul. Bereich	
KSt II	0,95	94-98	
SM	2,35	2,35-2,75	
AM	1,80	1,4-1,8	
C3S	52,7	45-65	
C2S	14,5	10-30	
C3A	8,8	5-15	
C4AF	8,7	5-12	
Theor. WV	395,6	kcal/kg	Theor. Wärmebedarf
S/A	0,27	(0,8 - 1,2)	Alkalisulfat
LP	24	(24 - 28)	Liquide Phase (Lea)

Anhang 17: Rohmehlmischung 12



Festgelegte Zielwerte

KSt II	0,97
SM	2,35
AM	1,8

RAW MIX 13

Werte der Ausgangsprobe (Raw mix with LOI)

Probe	X2	37	2	R9	total mix
%ratio	61,78	30,82	0,73	6,67	100,00
L.O.I	39,70	13,28	13,67	24,06	30,32
SiO2	1,49	32,74	34,27	15,59	12,30
Al2O3	1,63	6,58	7,67	4,10	3,36
Fe2O3	0,44	2,72	3,02	11,03	1,87
CaO	52,18	17,20	11,56	12,17	38,43
MgO	3,99	2,60	3,48	2,33	3,45
Mn2O3	0,04	0,07	0,10	0,85	0,11
TiO2	0,03	0,37	0,38	0,29	0,15
K2O	0,04	1,09	1,93	0,69	0,42
Na2O	0,23	0,47	0,66	0,28	0,31
SO3	0,14	0,34	2,24	0,51	0,24
P2O5	0,01	0,11	0,12	0,23	0,06
Cl	0,02	0,00	0,04	0,01	0,01
Rest	0,06	0,13	1,03	0,63	8,95
Summe	100,00	77,73	80,17	72,77	100,00

Geglühte Proben (LOI free)

Probe	X2	37	2	R9	total mix
%ratio	53,47	38,35	0,91	7,27	100,00
SiO2	2,47	37,75	39,70	20,53	17,65
Al2O3	2,70	7,59	8,89	5,40	4,83
Fe2O3	0,73	3,14	3,50	14,53	2,68
CaO	86,53	19,84	13,39	16,03	55,16
MgO	6,62	3,00	4,03	3,06	4,95
Mn2O3	0,07	0,08	0,11	1,12	0,15
TiO2	0,05	0,43	0,44	0,38	0,22
K2O	0,07	1,26	2,24	0,91	0,61
Na2O	0,38	0,54	0,77	0,36	0,45
SO3	0,23	0,39	2,60	0,67	0,35
P2O5	0,02	0,13	0,14	0,30	0,08
Cl	0,03	0,00	0,05	0,01	0,02
Rest	0,10	0,15	1,19	0,83	12,85
Summe	100,00	74,32	77,03	64,14	100,00

Ergebnis: Moduli und Klinkerphasen

Moduli	Wert	zul. Bereich	
KSt II	0,97	94-98	
SM	2,35	2,35-2,75	
AM	1,80	1,4-1,8	
C3S	54,1	45-65	
C2S	10,1	10-30	
C3A	8,3	5-15	
C4AF	8,2	5-12	
Theor. WV	381,8	kcal/kg	Theor. Wärmebedarf
S/A	0,24	(0,8 - 1,2)	Alkalisulfat
LP	23	(24 - 28)	Liquide Phase (Lea)

Anhang 18: Rohmehlmischung 13



Festgelegte Zielwerte

KSt II	0,98
SM	2,75
TM	1,4

RAW MIX 14

Werte der Ausgangsprobe (Raw mix with LOI)

Probe	X2	X3	R10	R1	total mix
%ratio	63,01	6,26	17,58	13,15	100,00
L.O.I	39,70	21,30	3,97	9,10	28,24
SiO2	1,49	21,00	56,20	10,88	13,56
Al2O3	1,63	6,77	2,96	6,90	2,88
Fe2O3	0,44	23,60	1,22	0,65	2,06
CaO	52,18	12,50	4,73	56,02	41,86
MgO	3,99	3,26	1,09	2,08	3,18
Mn2O3	0,04	0,48	0,03	0,11	0,08
TiO2	0,03	0,95	0,12	0,33	0,14
K2O	0,04	0,72	0,99	0,29	0,28
Na2O	0,23	2,47	0,49	0,21	0,41
SO3	0,14	1,68	0,15	0,86	0,33
P2O5	0,01	0,50	0,04	0,27	0,08
Cl	0,02	0,43	0,00	0,31	0,08
Rest	0,06	4,34	0,49	0,40	6,81
Summe	100,00	99,99	72,47	88,40	100,00

Geglühte Proben (LOI free)

Probe	X2	X3	R10	R1	total mix
%ratio	52,95	6,87	23,53	16,66	100,00
SiO2	2,47	26,68	58,52	11,97	18,90
Al2O3	2,70	8,60	3,08	7,59	4,01
Fe2O3	0,73	29,99	1,27	0,72	2,86
CaO	86,53	15,88	4,92	61,63	58,33
MgO	6,62	4,14	1,13	2,29	4,44
Mn2O3	0,07	0,61	0,03	0,12	0,11
TiO2	0,05	1,21	0,13	0,36	0,20
K2O	0,07	0,91	1,03	0,32	0,40
Na2O	0,38	3,14	0,51	0,23	0,57
SO3	0,23	2,13	0,15	0,95	0,46
P2O5	0,02	0,64	0,04	0,29	0,11
Cl	0,03	0,55	0,00	0,34	0,11
Rest	0,10	5,51	0,51	0,44	9,49
Summe	100,00	99,99	71,33	87,24	100,00

Ergebnis: Moduli und Klinkerphasen

Moduli	Wert	zul. Bereich	
KSt II	0,98	94-98	
SM	2,75	2,35-2,75	
TM	1,40	1,4-1,8	
C3S	62,7	45-65	
C2S	7,2	10-30	
C3A	5,8	5-15	
C4AF	8,7	5-12	
Theor. WV	392,8	kcal/kg	Theor. Wärmebedarf
S/A	0,38	(0,8 - 1,2)	Alkalisulfat
LP	21	(24 - 28)	Liquide Phase (Lea)

Anhang 19: Rohmehlmischung 14

Festgelegte Zielwerte

KSt II	0,98
SM	2,75
TM	1,4

RAW MIX 15

Werte der Ausgangsprobe (Raw mix with LOI)

Probe	X1	R4	R10	X3	total mix
%ratio	41,89	49,94	3,89	4,28	100,00
L.O.I	40,00	24,40	3,97	21,30	30,01
SiO <sub>2</sub>	0,20	17,05	56,20	21,00	11,68
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,63	2,78	2,96	6,77	2,48
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10	1,34	1,22	23,60	1,77
CaO	56,00	23,78	4,73	12,50	36,05
MgO	0,76	5,58	1,09	3,26	3,29
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,13	0,03	0,48	0,09
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,14	0,12	0,95	0,12
K <sub>2</sub> O	0,03	0,33	0,99	0,72	0,25
Na <sub>2</sub> O	0,02	0,27	0,49	2,47	0,27
SO <sub>3</sub>	0,03	0,55	0,15	1,68	0,37
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,01	0,06	0,04	0,50	0,06
Cl	0,01	0,02	0,00	0,43	0,03
Rest	1,21	0,10	0,49	4,34	13,55
Summe	100,01	76,54	72,47	99,99	100,00

Geglühte Proben (LOI free)

Probe	X1	R4	R10	X3	total mix
%ratio	35,91	53,94	5,34	4,82	100,00
SiO <sub>2</sub>	0,33	22,55	58,52	26,68	16,69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,72	3,68	3,08	8,60	3,54
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,17	1,77	1,27	29,99	2,53
CaO	93,33	31,45	4,92	15,88	51,50
MgO	1,27	7,38	1,13	4,14	4,69
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,17	0,03	0,61	0,13
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,19	0,13	1,21	0,17
K <sub>2</sub> O	0,05	0,44	1,03	0,91	0,35
Na <sub>2</sub> O	0,03	0,36	0,51	3,14	0,38
SO <sub>3</sub>	0,05	0,73	0,15	2,13	0,52
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02	0,08	0,04	0,64	0,08
Cl	0,02	0,03	0,00	0,55	0,05
Rest	2,02	0,13	0,51	5,51	19,36
Summe	100,01	68,96	71,33	99,99	100,00

Ergebnis: Moduli und Klinkerphasen

Moduli	Wert	zul. Bereich	
KSt II	0,98	94-98	
SM	2,75	2,35-2,75	
TM	1,40	1,4-1,8	
C3S	55,4	45-65	
C2S	6,4	10-30	
C3A	5,1	5-15	
C4AF	7,7	5-12	
Theor. WV	351,9	kcal/kg	Theor. Wärmebedarf
S/A	0,55	(0,8 - 1,2)	Alkalisulfat
LP	19	(24 - 28)	Liquide Phase (Lea)

Anhang 20: Rohmehlmischung 15

Festgelegte Zielwerte

KSt II	0,98
SM	2,75
TM	1,8

RAW MIX 16

Werte der Ausgangsprobe (Raw mix with LOI)

Probe	X1	R5	18	R4	total mix
%ratio	47,99	3,07	20,45	28,49	100,00
L.O.I	40,00	1,10	14,91	24,40	29,23
SiO2	0,20	54,07	27,70	17,05	12,28
Al2O3	1,63	14,96	4,08	2,78	2,87
Fe2O3	0,10	5,56	4,86	1,34	1,59
CaO	56,00	4,23	20,79	23,78	38,03
MgO	0,76	2,36	5,89	5,58	3,23
Mn2O3	0,00	0,28	1,06	0,13	0,26
TiO2	0,00	0,84	0,24	0,14	0,12
K2O	0,03	2,48	0,59	0,33	0,31
Na2O	0,02	1,18	0,30	0,27	0,18
SO3	0,03	0,05	0,83	0,55	0,34
P2O5	0,01	0,17	0,19	0,06	0,07
Cl	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01
Rest	1,21	0,20	0,32	0,10	11,48
Summe	100,01	87,49	81,78	76,54	100,00

Geglühte Proben (LOI free)

Probe	X1	R5	18	R4	total mix
%ratio	40,68	4,29	24,59	30,43	100,00
SiO2	0,33	54,67	32,56	22,55	17,35
Al2O3	2,72	15,13	4,80	3,68	4,06
Fe2O3	0,17	5,63	5,71	1,77	2,25
CaO	93,33	4,28	24,44	31,45	53,74
MgO	1,27	2,39	6,92	7,38	4,57
Mn2O3	0,00	0,28	1,24	0,17	0,37
TiO2	0,00	0,85	0,28	0,19	0,16
K2O	0,05	2,51	0,70	0,44	0,43
Na2O	0,03	1,19	0,36	0,36	0,26
SO3	0,05	0,05	0,98	0,73	0,49
P2O5	0,02	0,17	0,22	0,08	0,09
Cl	0,02	0,00	0,00	0,03	0,02
Rest	2,02	0,20	0,38	0,13	16,21
Summe	100,01	87,35	78,59	68,96	100,00

Ergebnis: Moduli und Klinkerphasen

Moduli	Wert	zul. Bereich	
KSt II	0,98	94-98	
SM	2,75	2,35-2,75	
TM	1,80	1,4-1,8	
C3S	56,4	45-65	
C2S	7,5	10-30	
C3A	6,9	5-15	
C4AF	6,9	5-12	
Theor. WV	367,0	kcal/kg	Theor. Wärmebedarf
S/A	0,51	(0,8 - 1,2)	Alkalisulfat
LP	20	(24 - 28)	Liquide Phase (Lea)

Anhang 21: Rohmehlmischung 16

Eval2 V1.7.408 Admin 10.11.2015 08:39:56  
 Probe: LP 60  
 Gemessen an 04.09.2015 09:39:50  
 Probe gemessen mit Admin  
 Messmethode: MultiRes-Vac34

SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>
57,85	27,35	0,572	0,4680	0,409	0,029	0,023
K <sub>2</sub> O	NiO	WO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	CuO	ZnO	Summe
0,009	0,0081	0,006	0,0042	0,003	0,002	86,72

**Anhang 22: Talkprobe als Oxide ausgewertet.**

Eval2 V1.7.408 Admin 10.11.2015 08:41:45  
 Probe: LP 60  
 Gemessen an 04.09.2015 09:39:50  
 Probe gemessen mit Admin  
 Messmethode: MultiRes-Vac34

Mg <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O
92,42	0,591	0,4364	0,393	0,029	0,021	0,008
NiO	WO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	CuO	ZnO	Summe	
0,0076	0,005	0,0041	0,003	0,002	93,92	

**Anhang 23: Talkprobe mit der Vorgabe der Talkverbindung (Mg[Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>]**

Eval2 V1.7.408 Admin 10.11.2015 08:41:35  
 Probe: LP 60  
 Gemessen an 04.09.2015 09:39:50  
 Probe gemessen mit Admin  
 Messmethode: MultiRes-Vac34

Mg <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O
98,44	0,641	0,4312	0,406	0,031	0,022	0,009
NiO	WO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	CuO	ZnO	Intensitäts Sk	
0,0075	0,005	0,0043	0,003	0,002	1,044	

**Anhang 24: Talkprobe mit der Vorgabe der Talkverbindung auf 100% normiert**

**PRÜFBERICHT**  
**Auftragsnr. 163624**

Analysenr. 318577  
 Auftrag BVH Wessenthaler  
 Probeneingang 09.03.2012  
 Probenahme 09.03.2012  
 Probennehmer Agrolab Austria Johann Waltenberger  
 Kunden-Probenbezeichnung MP leicht bis mittel kontaminiert

	Einheit	Ergebnis	Best.-Gr.	Grenzwert	Methode
<b>Feststoff</b>					
Trockensubstanz	%	* 94,6	0,1		EN 14348
Königswasseraufschluß					EN 13657 (Mikrowelle)
Aluminium (Al)	mg/kg	4070	5		EN ISO 11885
Antimon (Sb)	mg/kg	<5,00	5		EN ISO 11885
Arsen (As)	mg/kg	<5,0	5		EN ISO 11885
Barium (Ba)	mg/kg	104	5		EN ISO 11885
Beryllium (Be)	mg/kg	<5,00	5		EN ISO 11885
Blei (Pb)	mg/kg	<5,0	5		EN ISO 11885
Bor (B)	mg/kg	13	10		EN ISO 11885
Cadmium (Cd)	mg/kg	<0,50	0,5		EN ISO 11885
Calcium (Ca)	mg/kg	231000	200		EN ISO 11885
Chrom (Cr)	mg/kg	17	5		EN ISO 11885
Chrom VI	mg/kg	<0,20	0,2		i.A. EN 15192
Kobalt (Co)	mg/kg	<5,0	5		EN ISO 11885
Eisen (Fe)	mg/kg	6230	5		EN ISO 11885
Kupfer (Cu)	mg/kg	<5,0	5		EN ISO 11885
Magnesium (Mg)	mg/kg	40200	200		EN ISO 11885
Mangan (Mn)	mg/kg	428	5		EN ISO 11885
Molybdän (Mo)	mg/kg	<5,00	5		EN ISO 11885
Nickel (Ni)	mg/kg	15	5		EN ISO 11885
Quecksilber (Hg)	mg/kg	<0,10	0,1		EN 1483
Selen (Se)	mg/kg	<5,00	5		EN ISO 11885
Silber (Ag)	mg/kg	<5,00	5		EN ISO 11885
Thallium (Tl)	mg/kg	<1,00	1		EN ISO 11885
Vanadium (V)	mg/kg	8,16	5		EN ISO 11885
Zink (Zn)	mg/kg	22	5		EN ISO 11885
Zinn (Sn)	mg/kg	<5,00	5		EN ISO 11885
Kohlenstoff (C) organisch (TOC)	mg/kg	21600	1000		EN 13137
Glühverlust	%	2,5	0,1		EN 12879
Kohlenwasserstoffe C10-C40 (GC)	mg/kg	1080	10		EN 14039
POX	mg/kg	<1,0	1		i.A. DIN 38409-H25(PL)
Phenolindex	mg/kg	<0,10	0,1		EN ISO 14402(OB)

Anhang 25: Prüfbefund Probe 7 (Scan Nr. 101) aus dem Jahr 2012



Probe 411947 Glühverlust 11,51%		original Agrolab Messung von 2014	original Agrolab gemessen	geglühte Probe gemessen und auf original rückgerechnet Agrolab	geglühte Probe gemessen und auf original rückgerechnet TBS	original TBS gemessen Carbonate ausgewertet	original TBS gemessen CO2 ausgewertet
Chlor	ppm		0	0	n.n.	n.n.	n.n.
Schwefel	ppm		<NWG (1000)	<NWG (1000)	168	126	126
Silicium	%		17,2	16,5	16,9	18,7	18,7
Aluminium	ppm		13400	14512	20800	24500	24500
Calcium	ppm		87200	84331	97200	98900	100000
Eisen	ppm		10200	9557	15100	13100	13300
Kalium	ppm		3330	1681	6960	7740	7810
Magnesium	ppm		13500	12920	16500	11900	11900
Mangan	ppm		405	376	586	562	571
Natrium	ppm		526	1876	2590	3750	3720
Phosphor	ppm		217	208	296	268	269
Titan	ppm		351	529	1050	1150	1160

Probe 421152 Glühverlust 23,94%		original Agrolab Messung von 2014	original Agrolab gemessen	geglühte Probe gemessen und auf original rückgerechnet Agrolab	geglühte Probe gemessen und auf original rückgerechnet TBS	original TBS gemessen Carbonate ausgewertet	original TBS gemessen CO2 ausgewertet
Chlor	ppm		0	0	84	n.n.	n.n.
Schwefel	ppm		<200	<200	2820	2810	2640
Silicium	%		10,9	11,9	14,1	12,5	12,2
Aluminium	ppm		21300	22362	30900	29600	29800
Calcium	ppm		101000	95075	100000	97300	88800
Eisen	ppm		21100	16505	27800	28900	25500
Kalium	ppm		6900	3833	10100	12600	11600
Magnesium	ppm		17300	15820	15400	7850	8130
Mangan	ppm		4980	4602	4300	3250	2890
Natrium	ppm		1340	2099	3730	2620	2790
Phosphor	ppm		387	357	516	423	407
Titan	ppm		1090	1301	1940	2270	2040

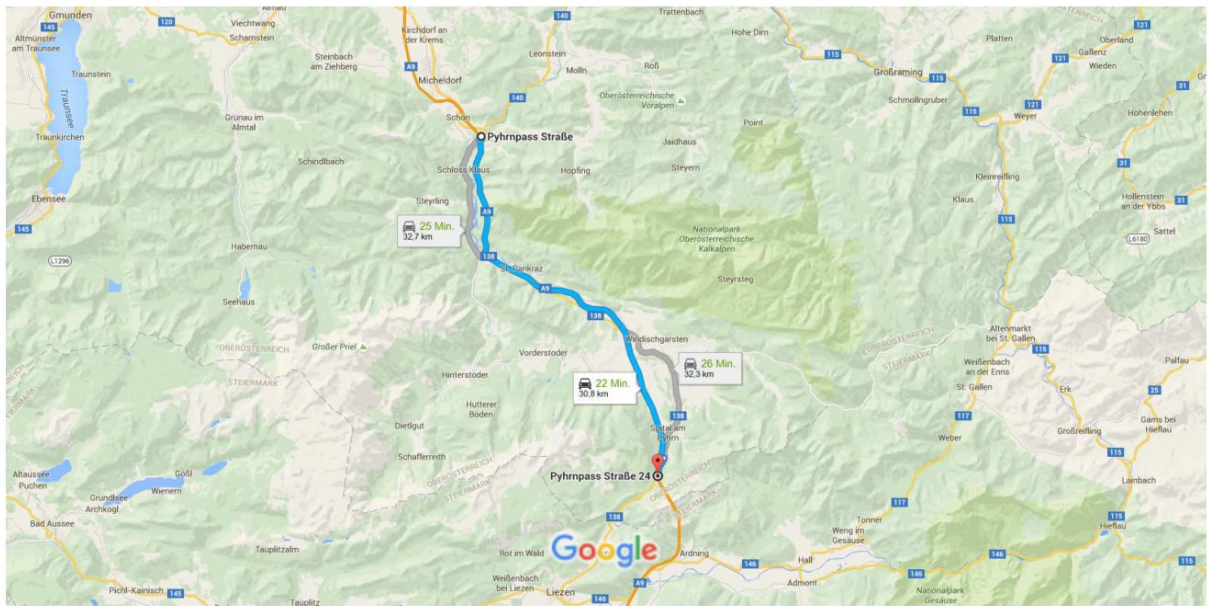
Probe 443183 Glühverlust 13,27%		original Agrolab Messung von 2014	original Agrolab gemessen	geglühte Probe gemessen und auf original rückgerechnet Agrolab	geglühte Probe gemessen und auf original rückgerechnet TBS	original TBS gemessen Carbonate ausgewertet	original TBS gemessen CO2 ausgewertet
Chlor	ppm		180	147	n.n.	n.n.	n.n.
Schwefel	ppm		<NWG (1000)	<NWG (1000)	969	927	917
Silicium	%		17,8	18,5	17,9	16,7	16,6
Aluminium	ppm	33800	17900	26100	45000	46000	46100
Calcium	ppm	88300	77700	84600	86200	82800	81500
Eisen	ppm	20900	16100	15600	21000	20300	19900
Kalium	ppm		4800	2770	15800	16600	16400
Magnesium	ppm	19700	14900	16000	18600	11700	11800
Mangan	ppm	739	1060	1030	942	802	786
Natrium	ppm		541	3340	5830	4670	4730
Phosphor	ppm		647	740	841	847	842
Titan	ppm		1150	1590	2510	2790	2740

#### Anhang 26: Auswertung Versuch Methodenvergleich



Pyhrnpass Straße, 4564 nach  
Pyhrnpass Straße 24, 4582

Mit dem Auto 30,8 km, 22 Min.



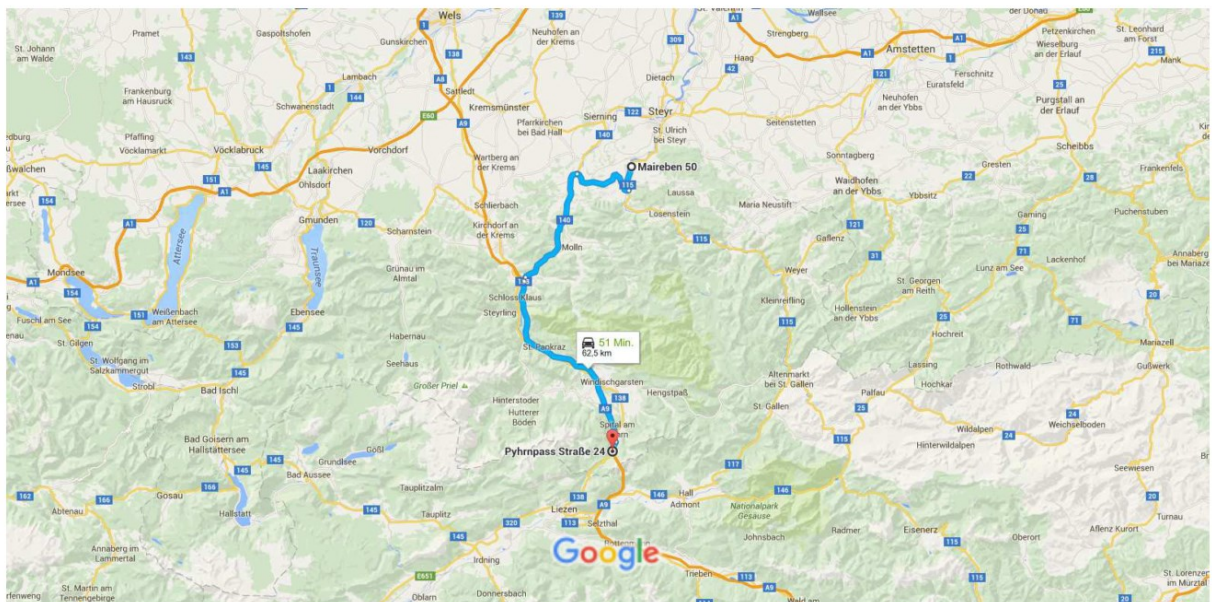
Kartendaten © 2016 Google 5 km

### Anhang 27: Betonmischanlage Klaus – TRVA Spital am Pyhrn (Quelle: Google Maps)



Maireben 50, 4452 Ternberg nach  
Pyhrnpass Straße 24, 4582

Mit dem Auto 62,5 km, 51 Min.



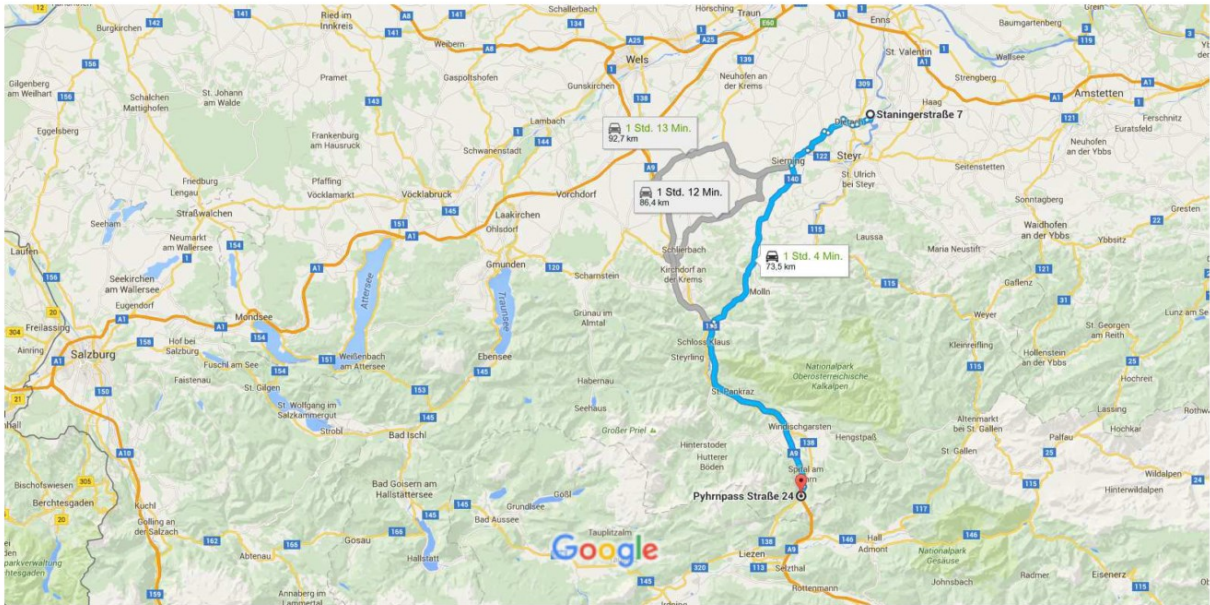
Kartendaten © 2016 GeoBasis-DE/BKG (©2009),Google 10 km

### Anhang 28: Betonmischanlage Ternberg – TRVA Spital am Pyhrn (Quelle: Google Maps)



Staningerstraße 7, 4407 Winkling  
nach Pyhrnpass Straße 24, 4582

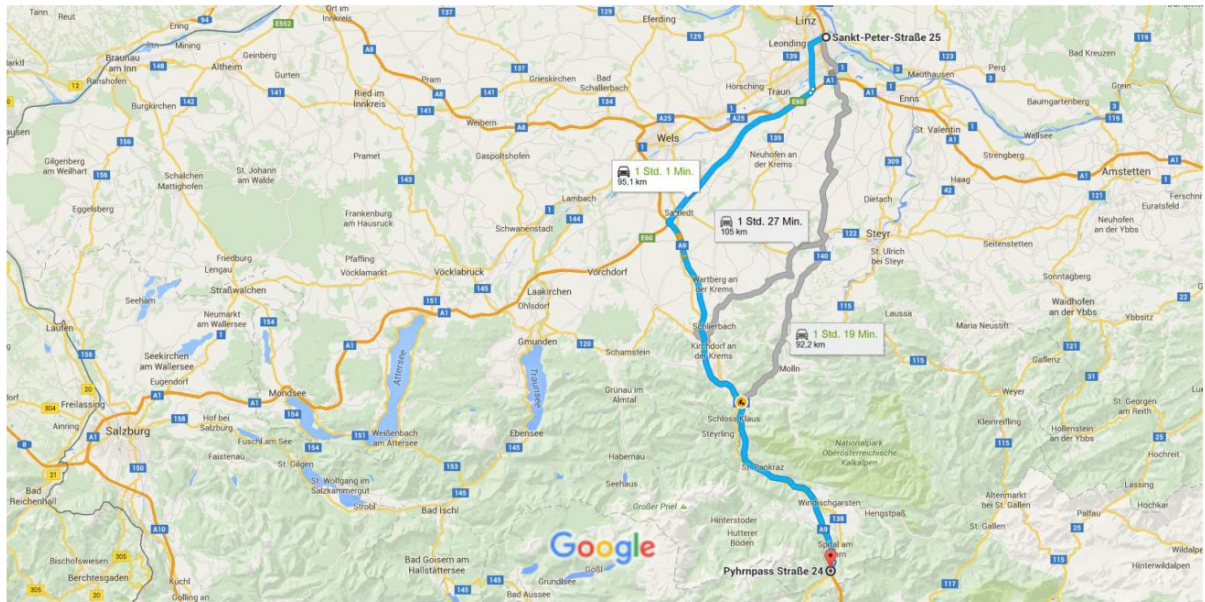
Mit dem Auto 73,5 km, 1 Std. 4 Min.



**Anhang 29: Betonmischanlage Dietach – TRVA Spital am Pyhrn  
(Quelle: Google Maps)**

Sankt-Peter-Straße 25, 4020 Linz  
nach Pyhrnpass Straße 24, 4582

Mit dem Auto 95,1 km, 1 Std. 1 Min.

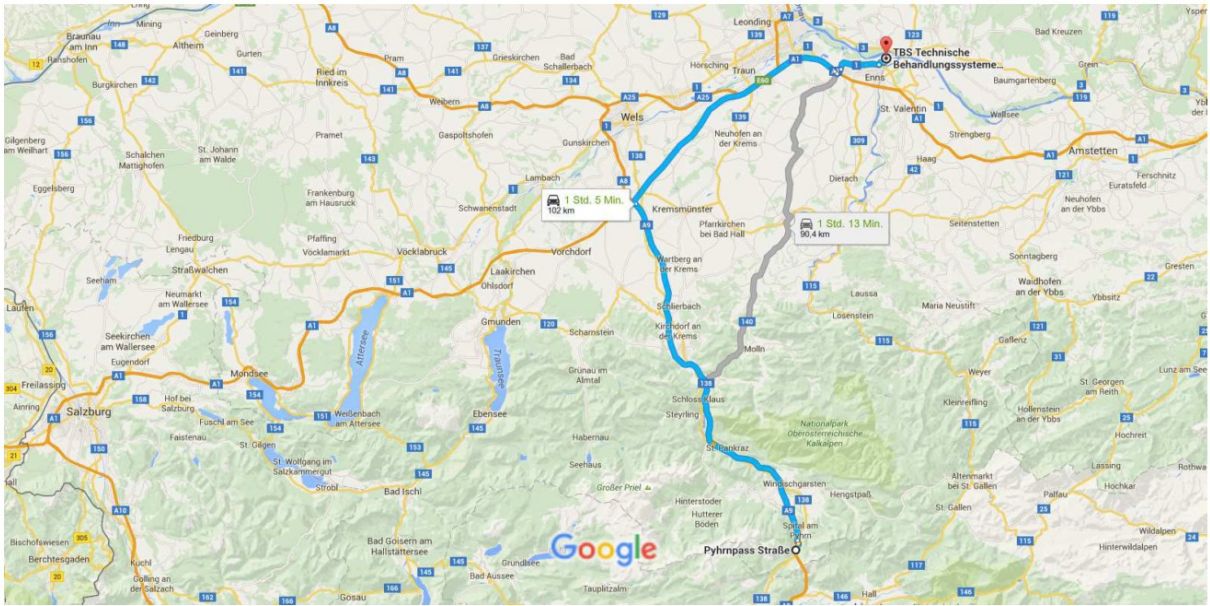


**Anhang 30: Betonmischanlage Linz – TRVA Spital am Pyhrn  
(Quelle: Google Maps)**





Pyhrnpass Straße, 4582 nach TBS Mit dem Auto 102 km, 1 Std. 5 Min.  
Technische Behandlungssysteme GmbH - Standort Enns

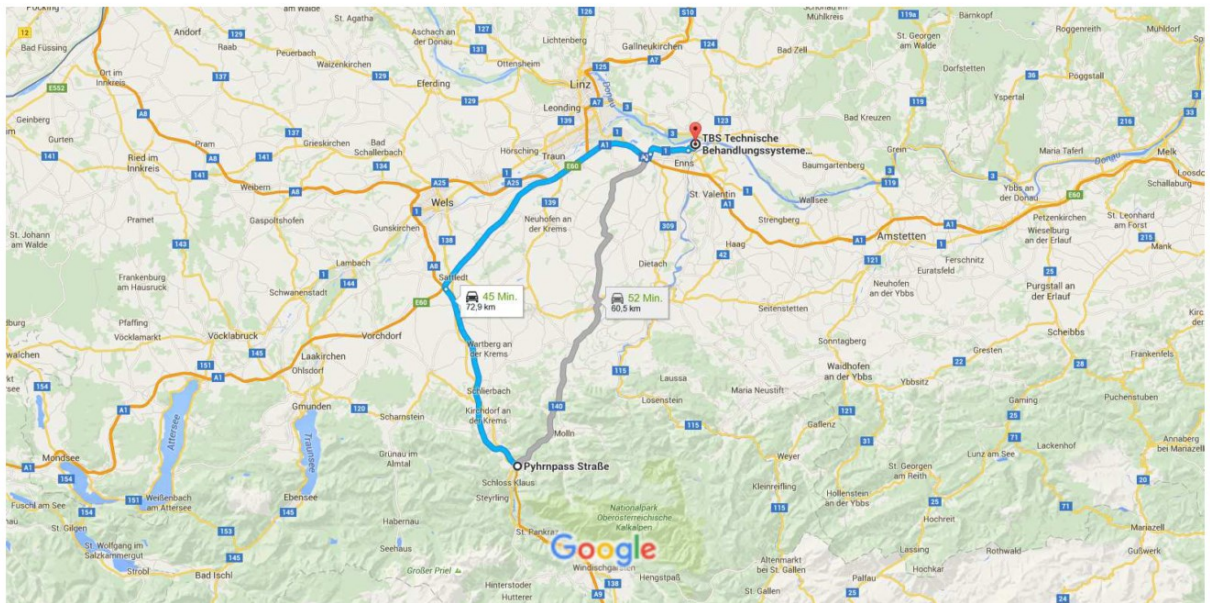


Kartendaten © 2016 GeoBasis-DE/BKG (©2009),Google 10 km

### Anhang 31: Betonmischanlage Spital am Pyhrn – TRVA Enns (Quelle: Google Maps)



Pyhrnpass Straße, 4564 nach TBS Mit dem Auto 72,9 km, 45 Min.  
Technische Behandlungssysteme GmbH - Standort Enns

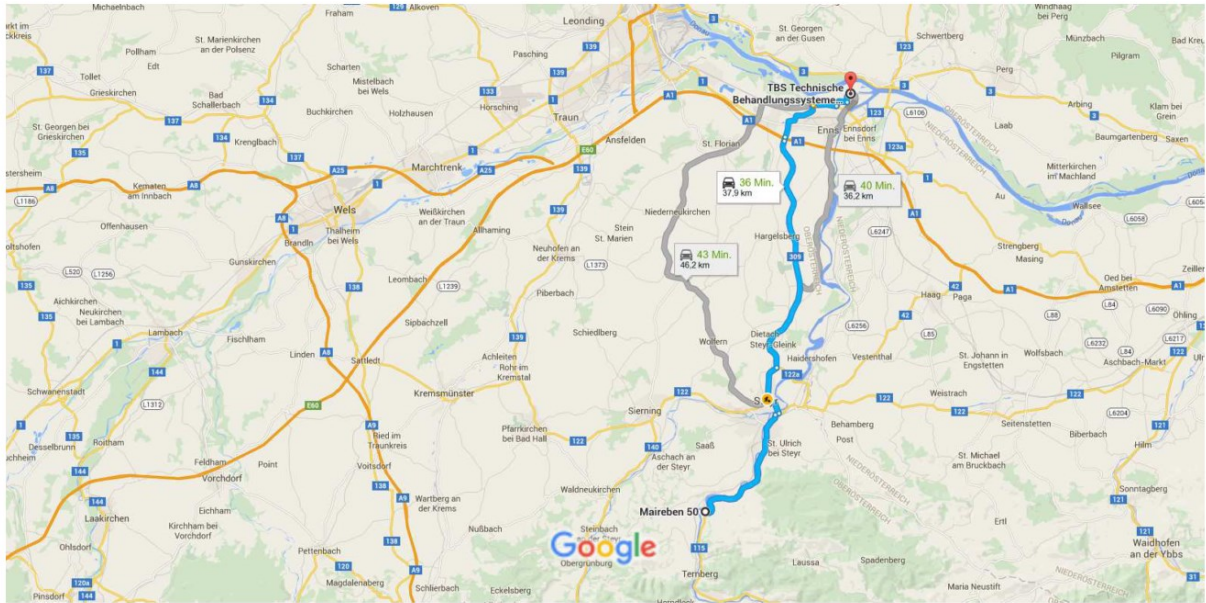


Kartendaten © 2016 GeoBasis-DE/BKG (©2009),Google 10 km

### Anhang 32: Betonmischanlage Klaus – TRVA Enns (Quelle: Google Maps)

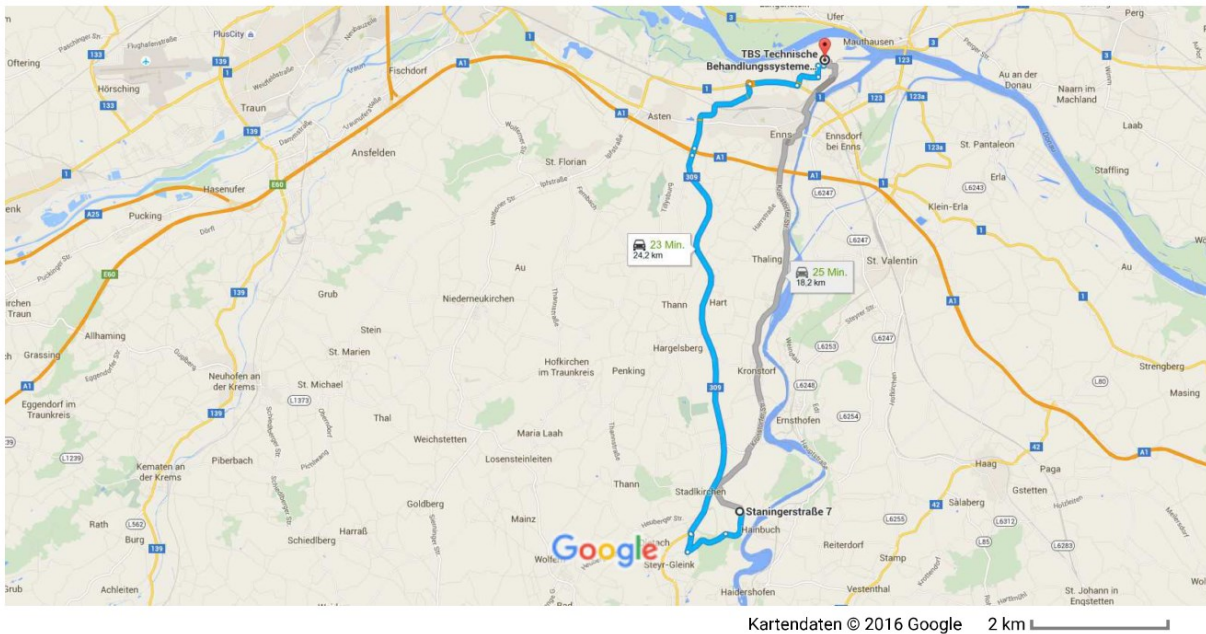


Maireben 50, 4452 Ternberg nach TBS Technische Behandlungssysteme GmbH - Standort Enns Mit dem Auto 37,9 km, 36 Min.

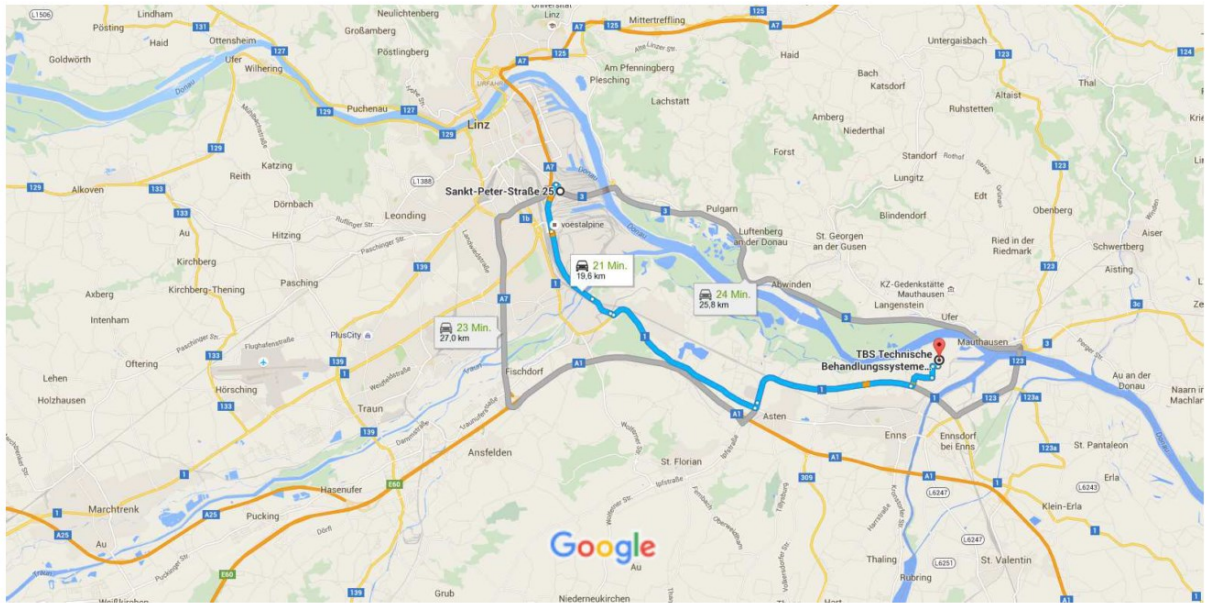


**Anhang 33: Betonmischanlage Ternberg – TRVA Enns (Quelle: Google Maps)**

Staningerstraße 7, 4407 Winkling nach TBS Technische Behandlungssysteme GmbH - Standort Enns Mit dem Auto 24,2 km, 23 Min.



**Anhang 34: Betonmischanlage Dietach – TRVA Enns (Quelle: Google Maps)**



**Anhang 35: Betonmischanlage Linz – TRVA Enns  
(Quelle: Google Maps)**