

Neue Technologien in der Zementproduktion zur Reduzierung der CO₂-Emission

Projektbericht AZ: 27006

IBU|tec

IBU-tec advanced materials AG

Hainweg 9-10
99425 Weimar

Bauhaus-Universität Weimar

Bauhaus-Universität Weimar
F.A. Finger Institut für Baustoffkunde
Coudraystr. 11A
99421 Weimar



Friedrich-Schiller-Universität Jena
Institut für Chemie und Umweltchemie
Lessingstraße 12
07743 Jena

Unterstützt durch



Dyckerhoff AG
Biebricher Straße 69
D-65203 Wiesbaden

Gefördert durch



Deutsche Bundesstiftung Umwelt

DBU – Deutsche Bundesstiftung Umwelt

An der Bornau 2
49090 Osnabrück

Verfasser:

Steffen Vogel, IBU-tec advanced materials AG
Dr. Denise Ott, Friedrich Schiller-Universität Jena
Dennys Dressel, Bauhaus-Universität Weimar

Weimar/Jena, 25.07.2011

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	27006	Referat	21/2	Fördersumme	249.084 €
----	--------------	---------	-------------	-------------	------------------

Antragstitel **Neue Technologien bei der Zementproduktion zur Reduzierung von Kohlendioxidemissionen**

Stichworte

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
24 Monate	01.05.2009	30.04.2011	

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger	IBU-tec advanced materials AG Hainweg 9-10 99425 Weimar	Tel	03643/8649-40
		Fax	03643/8649-30

Projektleitung

Steffen Vogel

Bearbeiter

Kooperationspartner Bauhaus Universität Weimar, F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde
Dr. Frank Bellmann
Coudraystraße 11, 99423 Weimar

Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Techn. Chemie und Umweltchemie
Prof. Dr. Günter Kreisel, Lessingstraße 12, 07743 Jena

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Die Zementproduktion für die Betonherstellung ist für etwa 3 % der gesamten Kohlendioxidemissionen in der BRD verantwortlich. Weiterhin werden etwa 40 Mio. Tonnen Kalkstein, Mergel und andere Gesteine gefördert und für die Produktion verbraucht. Der Jahresbedarf an Elektroenergie liegt bei etwa 3 Mrd. kWh. Ziel des hier vorliegenden Vorhabens ist die Darstellung neuer Verfahrensmöglichkeiten mit denen die **CO₂-Emissionen um bis zu 50 % reduziert** werden können. Weiterhin werden **nachhaltige Einsparungen bei Gesteinsverbrauch (bis 60 %) und des Brennstoffbedarfs (bis 25 %)** angestrebt, bei gleicher Leistungsfähigkeit des hergestellten Zementes.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Die Umsetzung erfolgt durch die weitgehende Substitution der Gesteine für die Portlandzementklinkerherstellung durch Anfallstoffe aus anderen industriellen Prozessen (Stahlerzeugung, Braunkohlenverstromung, Müllverbrennung). Es werden Rohmehlmischungen unter Verwendung der Anfallstoffe entwickelt. Die Umweltrelevanz und die technische Verfügbarkeit werden dabei berücksichtigt. Die experimentelle Überprüfung der Modellüberlegungen erfolgt durch geeignete Brennversuche. Mit einem Gradienten-ofen kann der Brennprozess für Zementklinker im Labormaßstab durchgeführt werden. Die in den Versuchen hergestellten Klinker bzw. die Eignung der Rohmehlmischung werden chemische und quantitative Röntgenphasenanalysen bewertet. Für fünf Rohmehlmischungen wird die CO₂ Bilanz (Transport bis Brennprozess) als ein entscheidendes Kriterium zur Auswahl der Vorzugsvariante aufgestellt (Universität Jena). Nach der Optimierung der Rohmehleigenschaften werden Brennversuche im Drehrohrofen 1m x 12m der Firma IBU-tec durchgeführt. Daraus ergibt sich zum einen eine hohe Übertragbarkeit auf großtechnische Anlagen zum anderen werden repräsentative Klinkermenge für die Ermittlung von zementtechnischen Kennwerten gewonnen. In der Gesamtauswertung werden die Daten aus technischen Versuchen, Ökobilanzierung (Universität Jena), Wirtschaftlichkeitsrechnung und Reichweitenanalyse zusammengefasst.

Die Entwicklung der Rohmehlszenarien, die Versuche und Analysen werden durch die Bauhaus-Universität und IBU-tec durchgeführt. Die Beurteilung der Zementqualität erfolgt durch die Bauhaus-Universität.

Neu ist die Verwendung von verschiedenen, bisher nicht bzw. nicht in diesen Umfang genutzten Anfallstoffe.

Ergebnisse und Diskussion

Mit dem Projekt wurde erfolgreich ein Verfahren und dessen technologische Umsetzung zur Reduzierung der Kohlendioxidemission bei der Herstellung von Zementklinker entwickelt. Für ein konkretes Beispiel wurde eine mögliche Reduzierung der rohstoffbedingten Kohlendioxidemission von bis zu 21 % ermittelt. Durch die Verringerung des theoretischen Wärmebedarfs durch Verringerung des Energiebedarfs für die Kalksteinentsäuerung können die brennstoffbedingten CO₂ Emissionen um ca. 13 % verringert werden. Die alternativen Rohmehlmischungen wurden unter Berücksichtigung der regionalen Verfügbarkeit, der chemischen Affinität, des CO₂-Einsparpotentials und weiterer Kriterien ermittelt.

Von 11 für einen Standort ermittelten möglichen alternativen Rohmehlen wurde für den Brennversuch im Drehrohrofen 1m x 12m das Rohmehl ausgewählt für das auch eine großtechnische Umsetzung im Referenzzementwerk realistisch ist. Es setzt sich aus den Komponenten Kalksteinmehl, Braunkohlenflugasche, Porenbetonmehl und Fremdsand zusammen. Zum Vergleich wurde ein Brennversuch mit dem Rohmehl des Referenzwerkes durchgeführt. Die bereits im Labor ermittelte bessere Brennbarkeit des alternativen Rohmehles und die Verringerung der CO₂-Emissionen (weniger CO₂ im Rohstoff und Brennstoffeinsparung) konnten bestätigt werden.

Die in den Brennversuchen hergestellten Klinker wurden zu Zement und Betonen verarbeitet und Untersuchungen zur Ermittlung der Qualität durchgeführt. Beide Zemente sind der Festigkeitsklasse 52,5 R zuzuordnen. Die hergestellten Zemente und Betone ähneln sich in ihren Anwendungseigenschaften.

Aufgrund der Rohstoffverfügbarkeit, der Kosten (Kauf und Transport), unerwünschter Nebenbestandteile und des Wegfalls von Hochofenschlacke konnte für das konkrete Beispiel die angestrebte Reduzierung von 50 % CO₂ nicht erreicht werden. In Abhängigkeit von Standort, wirtschaftlicher Entwicklung und gesellschaftlicher Rahmenbedingungen (CO₂-Steuer, Gesetze) können höhere Reduzierungen erreicht werden. Mit diesem Projekt wird aufgezeigt, wie der Einsatz von alternativen Rohstoffen geplant und umgesetzt werden kann:

1. Ermittlung von alternativen Ca-haltigen Rohstoffen, Ermittlung der Zusammensetzung und Bewertung hinsichtlich Zusammensetzung, chemischer Affinität, Verfügbarkeit, Homogenität, Aufbereitung und aller damit verbundenen Kosten.
2. Berechnung von alternativen Rohmehlmischungen und Bewertung hinsichtlich CO₂-Einsparungspotential und Kostenkalkulation
3. Laboruntersuchungen zur Ermittlung der Brennbarkeit und der zu erwartenden Klinkerzusammensetzung.
4. Versuchsbrände wenn vor dem industriellen Einsatz die zementtechnischen und betontechnischen Kennwerte überprüft werden sollen.
5. Wenn erforderlich Anpassung der Ofenlinie (z.B. Lagerung, Aufbereitung, Dosierung und Transport neuer Rohstoffe, Bypass-Technologie, Brennstoffzusammensetzung).

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Veröffentlichungen der Pressemitteilungen der DBU erfolgte in zahlreichen Publikationen, z.B. Zement-Kalk-Gips, VDI-Nachrichten, Fachzeitschrift „beton“.

Nach Absprache mit den Projektpartnern sind eigene Veröffentlichungen und Präsentationen geplant. Das Projekt wird als Beispiel für ineinandergreifende labor- und verfahrenstechnische Dienstleistungen bei der Unternehmensborstellung und Vermarktung von IBU-tec verwendet.

Fazit

Durch Presseveröffentlichungen und eigene Vertriebsarbeit sind weitere mögliche Einsatzstoffe durch Dritte benannt worden. Auch wenn ein wirtschaftlicher Einsatz dieser Stoffe (z.B. Asche aus Abfallverbrennungsanlagen) z.Z. nicht möglich ist, können die Ergebnisse des Projektes auf diese übertragen werden.

Inhalt

1	Motivation und Zielstellung	9
2	Methoden und Bezugsgrößen	10
2.1.	Methoden	10
2.2.	Bezugsgrößen	11
3	Einsparpotentiale durch alternative Rohmehle	11
3.1.	Kriterien an Kalksteinsubstituenten	11
3.2.	Bewertete Anfallstoffe	12
3.2.1.	Kraftwerksaschen	12
3.2.2.	Stahlwerksschlacken	14
3.2.3.	Rückstände aus thermischen Verwertungsanlagen	14
3.2.4.	Porenbeton	15
3.2.5.	Aschen aus Biomasseheizkraftwerken	15
3.3.	Alternative Rohmehlszenarien	16
3.3.1.	Randbedingungen der Rohmehlberechnung	16
3.3.2.	Eingegrenzte Rohmehlszenarien	17
4	Brennversuche	19
4.1.	Laborbrennversuche	19
4.2.	Bewertung bisheriger Kriterien und Auswahl einer Vorzugsvariante	21
4.3.	Halbtechnische Brennversuche	22
5	Bewertung der Klinkerqualität	25
5.1.	Aufbereitung der Klinker	25
5.2.	Chemische und mineralogische Anforderungen	26
5.3.	Mechanische Anforderungen	27
5.4.	Physikalische Anforderungen	27
5.5.	Bewertung an Laborbetonen	29
5.5.1.	Druckfestigkeitsentwicklung	29
5.5.2.	Interaktion mit Betonadditiven	30
5.5.3.	Frost-Tausalz widerstand als Ausblick auf die Dauerhaftigkeit	32
6	Projektbegleitende ökologische Bewertung: Auswirkungen auf die CO ₂ -Bilanz in Abhängigkeit der Rohmehlzusammensetzung zur Klinkerproduktion	33
6.1.	Grundlagen	33
6.1.1.	Bilanzrahmen- und betrachtete Szenarien	33
6.1.2.	Zuordnung der CO ₂ -Emissionen	34
6.1.3.	Datenverfügbarkeit	35
6.1.4.	Verwendete Software und Datengrundlage	36
6.2.	Resultate	38
6.2.1.	Screening über alle Rohmehle	38

6.2.2.	Prozessbedingte CO ₂ -Emissionen.....	40
6.2.3.	Thermisch bedingte Emissionen: Rohstoffe.....	42
6.2.4.	Thermisch bedingte Emissionen: Brennstoffe	42
6.3.	Zusammenfassung.....	43
7	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	46
Literatur	49
Anhang	52
Anhang A:	chemische Analysen betrachteter Anfallstoffe.....	53
Anhang B:	Mineralphasenbestand der Anfallstoffe mittels QXRD.....	54
Anhang C:	Eckdaten der Betonrezepturen.....	55
Anhang D:	Zuordnung der Datenqualität auf der Bewertungsskala	56

Zusammenfassung

Mit dem Ziel, den Kalksteinanteil im Rohmehl durch geeignete industrielle Anfallstoffe partiell zu ersetzen, wurden verschiedene Anfallstoffe für diesen Einsatzzweck bewertet. Kriterien an diese Substituenten waren primär die chemische Eignung, die regionale und kontinuierliche Verfügbarkeit und das Einsparpotential bzgl. der CO₂-Emissionen bezogen auf den Produktionsprozess eines Portlandzementklinkers. Letzteres wurde in einem umfassenden Bilanzrahmen, beginnend vom Entstehungsprozess des Anfallstoffes bewertet. Nach den definierten Kriterien konnten vorwiegend Aschen aus Kohlekraftwerken, hier speziell Braunkohleasche, und Schlacken aus der Stahlerzeugung eingegrenzt werden. Rückstände aus thermischen Verwertungsanlagen oder Biomassekraftwerken wurden aufgrund der Anfallmengen und der chemischen Eignung nicht in die Versuchsplanung eingebunden. Als chemisch sehr gut geeignet, aber mit unklaren Anfallmengen, wurde Porenbetonrecycling limitiert betrachtet. An 4 verschiedenen Rohmehlszenarien mit jeweils 2-3 Variationen wurden die Rohmehlreaktivität und das CO₂-Einsparpotential durch Laborbrennversuche bewertet. In diesen Szenarien zeigten die Braunkohleaschen ein maximales Substitutionspotential von -14 %, bezogen auf ein Referenzszenario. Die Stahlwerksschlacken zeigen unter den gleichen Randbedingungen kein Potential zur Kalksteinsubstitution, da der Einsatz von Stahlwerksschlacke bereits bei geringen Mengen zu einer Abweichung von der definierten Zielstellung „Portlandzementklinker“ führt. Sehr effizient zeigte sich der Porenbeton, welcher – *sofern verfügbar* – ein Substitutionspotential von ebenfalls -14 % zeigte. Unter den Gesichtspunkten Einsparpotential, Wirtschaftlichkeit und Verfügbarkeit wurde ein Vorzugsszenario eingegrenzt, welche im Wesentlichen auf der Kombination Braunkohleasche und Porenbeton basiert. In einer Berechnung wurde gezeigt, dass das gleiche Einsparpotential auch ohne die Verfügbarkeit von Porenbeton umsetzbar ist. An dem Vorzugsszenario und an einem technischen Referenzmehl wurden unter Verwendung der Drehrohrofentechnik des Antragstellers halbtechnische Brennversuche durchgeführt, welche zum einen eine gute Übertragbarkeit des Brennprozesses auf eine großtechnische Anlage erlauben und zudem ausreichende Mengen an Klinker produzierten, um die technische Gleichwertigkeit an Bindemittel- und Betonversuchen zu demonstrieren. In den Brennversuchen wurde die verbesserte Brennbarkeit (geringerer Energieaufwand) des alternativen Rohmehls im Vergleich zum Referenzmehl belegt. Aus beiden Klinkern wurden durch Mahlung und Homogenisieren mit Calciumsulfat zwei Portlandzemente hergestellt, an welchen zementtechnische Parameter und beispielhafte Betonkennwerte direkt gegenüber gestellt wurden. Die Untersuchungen an Zement und Beton zeigten die qualitative Vergleichbarkeit beider Zemente (Klinker). Schwankungen aus Brennprozess und Aufbereitung führten hierbei aber zu deutlich höheren Schwankungen innerhalb der Einzelchargen, als dies bei einem industriell hergestellten Portlandzement der Fall ist. Mit Betonverflüssiger und Fließmittel reagieren beide Zemente in vergleichbarem Umfang. Die Herstellung von sensiblem Beton, wie dem hier geprüften Luftporenbeton, ist mit dem alternativen Klinker ohne qualitative Abstriche möglich. Ausblicke auf die Dauerhaftigkeit am Beton zeigten mittels CDF-Test keine signifikanten Nachteile im Vergleich zum Referenzzement. Das CO₂-Einsparpotential der Vorzugsvariante 1.3 beträgt nach einer umfassenden Bilanzierung unter Berücksichtigung der rohstoffbedingten Emission, des Transportes zum Verwendungsort und der veränderten Brennbedingungen -14 %. Das Einsparpotential der Vorzugsvariante stellt dabei nicht die maximal möglichen Einsparungen dar, sondern zeigt die Variante mit dem höchsten Potential auf eine großtechnische Umsetzung auf. Dieses Projekt endet an einer prozesstechnischen Problemstellung, welche in den halbtechnischen Brennversuchen nicht praxisnah betrachtet werden konnte. Durch den Einsatz der Braunkohleaschen und den damit verbundenen Schwefeleintrag in den inneren – und äußeren Kreislauf eines Drehrohrofens können sich Betriebsstörungen durch Ansatzbildung ergeben. Diese sind maßgeblich durch das Angebot an Alkalien und Chlor mitbestimmt. Lösungsansätze können sich durch eine angepasste Führung der Sekundärbrennstoffe oder moderne Bypassstechnologien ergeben. Durch Nutzung von Anfallstoffen, wie hier am Beispiel der Braunkohleaschen gezeigt wurde, ergeben sich neben der Emissionsminderung zudem die Effekte der Ressourcenschonung und Reduzierung von Deponiemengen.

1 Motivation und Zielstellung

Gegenwärtig leben ca. 7 Mrd. Menschen auf der Erde. Nach Schätzungen der Vereinten Nationen steigt diese Zahl bis zum Ende des Jahrhunderts– in Abhängigkeit der Geburtenrate – signifikant an. Der maßgebliche Bevölkerungszuwachs findet dabei in Entwicklungs- und Schwellenländern statt¹. Deren Entwicklungsfortschritt korreliert mit Prognosen zur weltweiten Zementproduktion Nach Schätzungen der International Energy

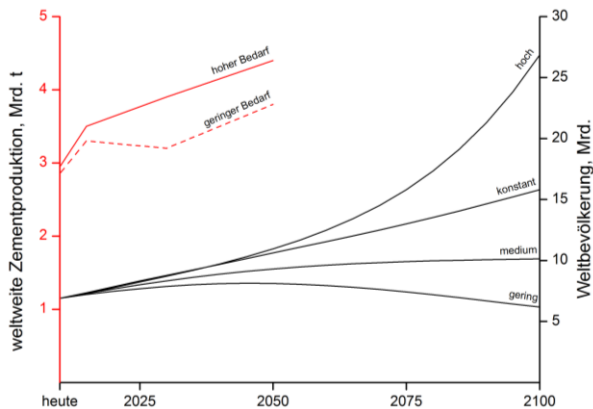


Abbildung 1: Prognose der globalen Zementproduktion und Entwicklung der Weltbevölkerung nach (1) und (2)

Agency, IEA, erhöht sich die Produktionskapazität bis zum Jahr 2050 von derzeit 2,5 Mrd. t auf 4,4 Mrd. t weltweit². Diese Zunahme wird begleitet von einem CO₂-Emissionsanstieg, resultierend aus der Zementproduktion, von derzeit 1,88 Gt/a auf bis zu 2,34 Gt/a. Diese Prognosen variieren stark in Abhängigkeit von den derzeit vorhandenen Emissionseinsparpotentialen wie Energieeffizienz, Sekundärbrennstoffen, Klinkersubstitution und künftigen Techniken wie CCS (*carbon capture and storage*).² Die aktuellen Prognosen zeigen, dass die Summe der derzeit technischen Möglichkeiten bei optimaler Ausnutzung die CO₂-Emissionen lediglich auf dem heutigen Niveau halten können und den prognostizierten Anstieg dämpfen. Mit dem Ansatz,

den Kalkstein als Rohmehlkomponente zu reduzieren und durch geeignete, industrielle Anfallstoffe zu ersetzen soll mit diesem Projekt ein weiteres Werkzeug zur Emissionsminderung bereitgestellt werden. Das Ziel ist dabei, durch partiellen Austausch des Kalksteins im Rohmehl einen breit einsetzbaren Portlandzementklinker herzustellen, der in seinen späteren Zement- und Betoneigenschaften keine qualitativen Nachteile gegenüber dem konventionell hergestellten Klinker aufweist. Als Substituenten treten industrielle Anfallstoffe, welche einzeln oder miteinander kombiniert die Funktion einzelner Rohmehlkomponenten übernehmen. Mit diesem Ansatz wird versucht, die rohstoffbedingte Emission von CO₂, welche mit ca. 0,6 t_{CO2}/t_{Klinker} etwa 2/3 der Gesamtemission darstellt, nachhaltig zu reduzieren

Im Rahmen dieses Projektes sollen mit Hilfe einer Optimierung der herkömmlichen Rohmehlzusammensetzung eine Reduktion der CO₂-Emissionen erreicht werden. Ein wesentlicher Anspruch besteht dabei in der Reduzierung des Primärrohstoffbedarfes unter Ersatz durch Sekundärrohstoffe, sogenannte Abfall- oder Anfallstoffe aus anderen Industriezweigen. Da diese zumeist bereits einer entsprechenden Wärmebehandlung unterzogen wurden, kann der Anteil an während des Ofenprozesses entstehenden CO₂-Freisetzungen reduziert werden. Ziel ist es ferner, die resultierenden CO₂-Emissionen während der Zementklinkerproduktion zu quantifizieren und zu vergleichen. Dabei soll in Anlehnung an die Methodik der Ökobilanzierung mit Hilfe einer CO₂-Bilanz ein Beitrag zur

- projektbegleitenden Evaluierung und Entwicklung ökologisch vorteilhafter Rohmehlszenarien zur Zementklinkerproduktion und zur
- Identifizierung von Optimierungspotentialen und Schwachstellen

geleistet werden.

¹ United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Polulation Division, *World Population Prospects, the 2010 Revision*, <http://esa.un.org/unpd/wpp/Excel-Data/population.htm>

² International Energy Agency: *Cement Technology Roadmap 2009. Carbon emissions reduction up to 2050.*, http://www.iea.org/papers/2009/Cement_Roadmap.pdf

2 Methoden und Bezugsgrößen

Im Folgenden wird auf die praktischen Arbeiten, deren theoretische Grundlagen und Methoden eingegangen, während in Kapitel 6 die Methodik der ökologischen Bewertung sowie die erhaltenen Ergebnisse reflektiert werden.

2.1. Methoden

Industrielle Anfallstoffe unterliegen rohstoff- und prozessbedingt höheren Schwankungen als konventionelle Ausgangsstoffe zur Zementherstellung. Die Eingangsdaten der Rohmehlberechnung (chem. Analysen) sind dabei mit dem Fehler aus den natürlichen Materialschwankungen und zudem dem Analysefehler der Methode behaftet. Sollte beispielsweise der analysierte CaO- und SiO₂-Gehalt der Ausgangsstoffe um nur $\pm 1\%$ abweichen, könnte sich dieser Analysefehler bis zu einer maximalen Änderung des Alit-Gehaltes des Klinkers von 17 % fortpflanzen. Für eine sichere Datenbasis der Materialanalyse wurden die gesamten Probechargen homogenisiert und parallel in den Laboren der Fa. IBU-tec und der BUW analysiert. Die Abweichungen zwischen beiden Laboren wurden unter Berücksichtigung von langjährigen Erfahrungswerten zum Material seitens der IBU-tec advance materials AG gemittelt. Für die deutlich größeren Mengen der halbertechnischen Brennversuche wurde anhand eines Probenahmeplans der Durchschnitt der

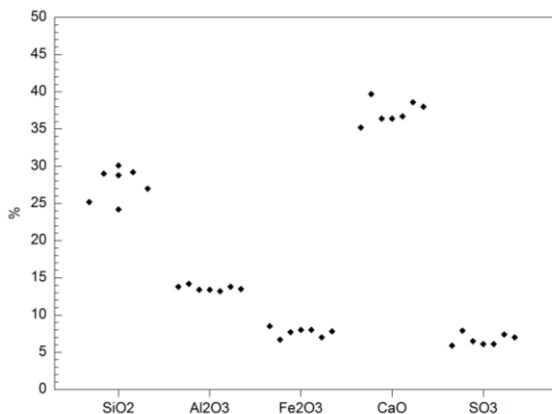


Abbildung 2: Fehlerbereich der chem. Zusammensetzung als Summe von Materialschwankungen, Probenahme und Analysefehler am Bsp. der BFA Schkopau bezogen auf eine Gesamtcharge von 3,5 t

Gesamtmenge an bis zu 6 Einzelwerten bestimmt. Ergänzend wurde der Mineralphasenbestand der Anfallstoffe mittels Röntgendiffraktometrie unter Verwendung eines internen Standards (20 % ZnO) bestimmt. Die quantitative Auswertung erfolgte nach der RIETVELD-Methode unter Verwendung der Software AUTOQUAN und TOPAS. Die Reaktivität (Brennbarkeit) der Rohmehle wurde in einem dynamischen Laborbrennverfahren bei der Fa. IBU-tec abgeschätzt. Das Verfahren ist in ³ beschrieben. Die Ergebnisse wurden durch statische Brennversuche an der BUW gestützt, welche zur Ermittlung des Klinkerphasenbestandes durchgeführt wurden. Aufbauend auf den Rohmehlreaktivitäten konnten erste Eingrenzungen der Ausgangsstoffe getroffen werden. Diese Auswahl war maßgeblich von ersten Bilanzierungen der FSU bzgl. des CO₂-Einsparpotentials beeinflusst. Unter Betrachtung der in Kapitel 3.1 definierten Kriterien wurde das Szenario ausgewählt, welches neben einer CO₂-Reduktion das höchste

Umsetzungspotential auf einer großtechnischen Anlage besitzt. In diese Auswahl flossen betriebswirtschaftliche Perspektiven aus dem Referenzwerk ein. Die Übertragbarkeit von Ergebnissen eines Laborbrennversuches auf den Drehrohren eines Zementwerkes ist sehr begrenzt. Das Technikum des Antragstellers erlaubt halbertechnische Brennversuche in Drehrohren, welche ein gutes „Scale up“ auf industrielle Anlagen erlauben (Kap.4.3). An dem favorisierten, alternativen Rohmehl und an einem industriellen Referenzmehl wurden Brennversuche in einem Drehrohren der Dimension 12 x 1 m durchgeführt. Das erhaltene Brenngut (Klinkergranalien) wurde in einer Kreislaufmahlanlage, bestehend aus einer Kugelmühle und einem Windsichter, zu Klinkermehl aufgemahlen. Aus dem Klinkermehl wurden durch Homogenisieren mit Calciumsulfat Laborzemente hergestellt, welche durch Mörtel- und Betonversuche in ihren Eigenschaften vergleichend bewertet wurden. Der Prozess der Zementherstellung wird somit vom Rohstoff bis zur Anwendung des Produktes im Beton begleitet und endet bei Ausblicken auf die Betondauerhaftigkeit, welche anhand des Frost-Tausalz widerstandes nach *Setzer et al.* ⁴ bewertet wurde.

³ Kieser, J.; Kraeher, B.; Gathemann, B. (1979): Modell zur Bestimmung der Rohmehlreaktivität unter praxisähnlichen Bedingungen. In: Zement-Kalk-Gips (09)

⁴ Setzer, M.; Fagerlund, G.; Janssen, D. J. (1996): CDF-Test - Prüfverfahren des Frost-Tau-Widerstandes von Beton mit Taumittel-Lösung (CDF). Rilem Recommendation. Unter Mitarbeit von M. Setzer, G. Fagerlund und D. J. Janssen.

2.2. Bezugsgrößen

Sowohl die Quantifizierung der Emissionseinsparung, als auch die Bewertung und Vergleichbarkeit des angestrebten Portlandzementklinkers, erfordern eine Referenz. In diesem Projekt wurde ein Zementwerk als Bezugsstandort definiert. Diese Fixierung bezieht sich auf die Verfügbarkeit von Rohstoffen und deren Transport zum Verwendungsort. Transportwege vom Entstehungsort zum Verwendungsort gehen direkt in die CO₂-Bilanz (Kapitel 6) ein. Aus durchschnittlichen Produktionskapazitäten des Werkes können erforderliche Mengen für einen kontinuierlichen Betrieb abgeschätzt werden. Für den Portlandzementklinker werden Verhältnisse der Hauptoxide und Moduli übernommen. Wesentliche Referenzwerte sind in Tabelle 1 und 2 gegeben.

Tabelle 1: Bezugsgrößen des Referenzrohmehls

Komponente	Kalkstein	Sand 1	Sand 2	Eisenkomponente
Anteil im Referenzrohmehl	89,10	6,10	4,30	0,40

Tabelle 2: Bezugsgrößen des Referenzklinkers

Oxid/Moduli	KST	SM	CaO _f	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	CaO	SiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	\bar{N}
Bezugswerte Referenzklinker	94,8	3,2	1,3	2,8	4,4	0,49	66,3	22,5	0,98	0,28	0,92

3 Einsparpotentiale durch alternative Rohmehle

Rohmehle entstehen durch Mahlen und Mischen der einzelnen Ausgangsstoffe. Sie entsprechen dabei nicht in jedem Fall der glühverlustbehafteten Zusammensetzung des Zementklinkers, da durch Zugabe von Prozessstäuben und -aschen das Rohmehl zum Ofen- bzw. Heißmehl ergänzt wird. Für die Bearbeitung in diesem Projekt entspricht das Rohmehl dem Ofeneinlaufmehl. Rohmehle von Portlandzementklinkern enthalten i.d.R. > 80 % Kalksteinanteil⁵. Weitere Bestandteile sind Tone (Al-Träger), Sande (Si-Träger) und Korrekturstoffe zur Regulierung des Eisengehaltes (z.B. Kiesabbrand). Für die Substitution des Hauptbestandteils, den Kalkstein, sind folgende Randbedingungen gegeben.

3.1. Kriterien an Kalksteinsubstituenten

Regionale Verfügbarkeit und Kontinuität

Die Produktion von Zement ist ein kontinuierlicher Prozess, welche mit Ausnahme von wenigen Wochen der Revision in den Wintermonaten, über das Jahr verteilt ist. Aus diesem Produktionsablauf leitet sich die Forderung nach einer kontinuierlichen Verfügbarkeit der Ausgangsstoffe ab. Mit Bezug auf einen Drehrohrofen und dessen Kapazität ergeben sich aus den Rohmehlberechnungen eine Mindestanfallmenge von ungefähr 10.000 t/a. Dieses Kriterium sichert den Einsatz von Anfallstoffen im Rohmehl ab, grenzt aber auch zahlreiche kleinere Anfallmengen aus Gründen der Wirtschaftlichkeit aus (z.B. Aschen aus Biomasseheizkraftwerken).

Chemische Affinität

Die Substitution des CaCO₃ im Rohmehl bedingt zwingend eine Orientierung der chemischen Eignung am Calciumgehalt des Anfallstoffes. Inwiefern sich ein Anfallstoff jedoch in das System CaO-SiO₂-Al₂O₃-Fe₂O₃ eingliedern lässt bestimmt darüber hinaus das Verhältnis dieser Hauptoxide maßgeblich.

⁵ Seidel, Gottfried; Huckauf, Horst; Stark, Jochen (1978): Brennprozeß und Brennanlagen. 1. Aufl.

CO₂-Einsparpotential

Das CO₂-Einsparpotential ergibt sich aus der ganzheitlichen Bilanzierung des Austauschprozesses. Hierin werden der stofflichen CO₂-Einsparung aus der Kalksteinsäuerung mögliche CO₂-Emissionen aus dem Produktionsprozess der Anfallstoffe, deren Transport zum Verwendungsort und veränderte Brennenergien entgegen gesetzt.

Weitere Kriterien

Das Produkt Zement und dessen Produktionsprozess unterliegen einer Vielzahl von Regularien, welche – *weitestgehend* – untangiert bleiben sollen. Der Eintrag von MgO (begrenzt auf 5,0 M.- % nach DIN EN 197-1) und der Eintrag von Schwermetallen, speziell Chrom, wurden in die Auswahlkriterien einbezogen.

3.2. Bewertete Anfallstoffe

Im Rahmen der Rohstoffauswahl wurden verschiedene Kraftwerksaschen, Stahlwerksschlacken, Aschen aus der Verbrennung von Hausmüll und Biomasse sowie Porenbetonabfälle bezüglich der definierten Kriterien bewertet. Die in der Antragsphase berücksichtigte Hochofenschlacke konnte durch einen massiven Rückgang der Anfallmengen von 8,14 Mio. t in 2007⁶ auf 5,39 Mio. t in 2009⁷ nicht im geplanten Umfang berücksichtigt werden, da die stark reduzierten Mengen vollständig in der Zementindustrie als Kompositmaterial gebunden waren. Die prinzipielle Eignung ist jedoch in *Wolter et. al.*⁸ dokumentiert.

3.2.1. Kraftwerksaschen

Der Anteil der Stromerzeugung aus Stein- und Braunkohle sank seit dem Jahr 1990 (56,7 %) kontinuierlich auf 42,2 % im Jahr 2010. Dieser Anteil differiert dabei in die zum Großteil importierte Steinkohle (23,4 %) und die ausschließlich inländisch geförderte Braunkohle (18,8 %).⁹ Für diese Art der Energieerzeugung wurden in 2010 ca. 56 Mio. t Steinkohle importiert (77 %) bzw. gefördert (23 %) und 170 Mio. t Braunkohle abgebaut. Die Kraftwerke zur Kohlenutzung sind flächig über Deutschland verteilt und konzentrieren sich nahe den Kohlerevieren. Über einen geplanten Ausbau der Kapazitäten informiert der Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND).¹⁰ Der Bearbeitungsstand für diese geplanten Kraftwerke variierte über den Bearbeitungszeitraum dieses Projektes mehrfach, mit kontinuierlicher Tendenz zu weniger Kraftwerksneubauten. Die Ereignisse im Kernkraftwerk Fukushima, Japan, im März 2011 führten in der BRD zu einer Änderung des deutschen Atomgesetzes (AtG), wonach der derzeitige Anteil der Kernenergie von 22,5 % bis zum Jahr 2022 vollständig substituiert werden soll. Energieerzeuger gehen in ihren Prognosen von einem konstanten oder steigendem Anteil der Kohle zur Energiegewinnung^{11,12,13} bis zu den Jahren 2030-2050 aus.

⁶ Merkel, Th (2008): Statistik zur Erzeugung und Nutzung von Eisenhüttenschlacken 2007. In: FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e. V. (Hg.): FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e. V. (Hg.) 2008. FEhS Report. Düsseldorf.

⁷ Merkel, Th (2010): Das Wirtschaftsjahr 2009. Produktion und Einsatz von Hochofe- und Stahlwerksschlacke. In: FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e. V. (Hg.): FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e. V. (Hg.) 2010. FEhS Report. Duisburg, S. 14.

⁸ Wolter, A.; Locher, G.; Geiseler, J. (2003): Blast furnace slag (BFS) as a raw materials substitute for clinker burning. In: VDZ (Hg.): VDZ Congress 2002. Process Technology of Cement Manufacturing. Process Technology of Cement Manufacturing. Düsseldorf. VDZ (Hg.) 2000 – Betontechnische Berichte, S. 361–367.

⁹ AG Energiebilanzen (2010): Braunkohledaten 2010. Hg.: AG Energiebilanzen, <http://www.ag-energiebilanzen.de>

¹⁰ Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland; Kohlekraftwerke: Neubau-Pläne, Widerstand und Erfolge, http://www.bund.net/bundnet/themen_und_projekte/klima_energie/kohlekraftwerke_stoppen/geplante_standorte/

¹¹ BP Energy Outlook 2030, www.deutschebp.de

¹² Shell energy scenarios to 2050, www.shell.com

¹³ World Energy Outlook 2010, <http://www.iea.org/weo/>

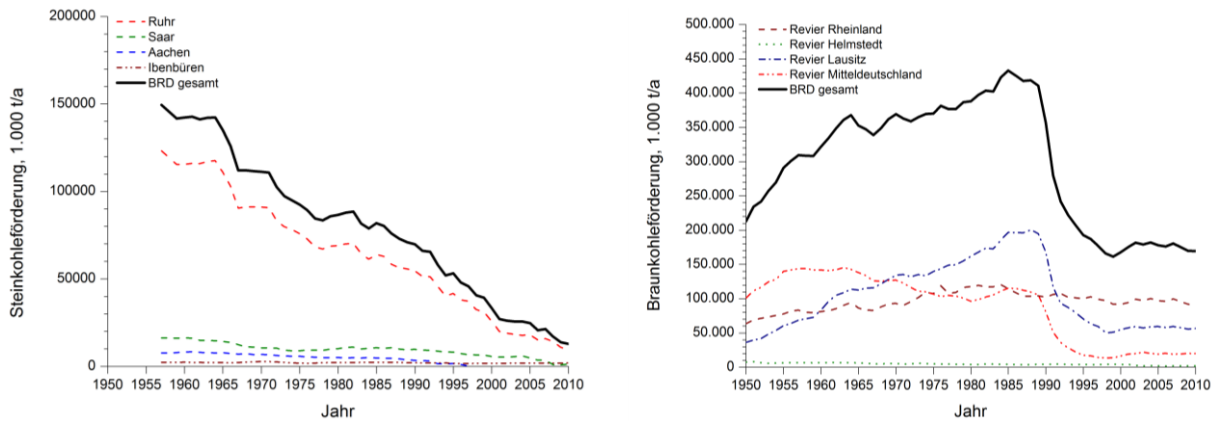


Abbildung 3: Entwicklung der Fördermengen an Stein- und Braunkohle

Steinkohleaschen (SFA)

Steinkohleaschen definieren sich in Ihrer chemischen Zusammensetzung maßgeblich durch den Kohlenstoffgehalt der Steinkohle. Mit einem Glasgehalt von 60 % bis 83 % setzen sie sich dabei hauptsächlich aus SiO₂ und Al₂O₃ zusammen und weisen im Mittel nur 1 % bis 12 % CaO-Anteil auf.¹⁴ Aus diesem Grund und der bereits intensiven Einbindung der SFA in die Baustoffindustrie als Zusatzstoff für Betone nach DIN 1045-5 bzw. DIN EN 206-1 werden Steinkohleflugaschen im Rahmen dieses Projektes nicht weiter betrachtet.

Braunkohleflugasche (BFA)

Im Jahr 2010 waren 48 Kraftwerke (>1 MW Leistung) am Netz, welche ausschließlich oder anteilig Braunkohle einsetzen.¹⁶ Braunkohleaschen entstehen bei der Verbrennung des Braunkohlestaubes bei ca. 1200°C und liegen als Filter- und als Nassasche vor. Der Aschegehalt liegt qualitäts- und abbaubedingt im Bereich von 2 M. % bis zu 20 M. %.¹⁷ Die Zusammensetzung der Braunkohleaschen differiert in Abhängigkeit des Braunkohlevorkommens (Reviers) und möglichen Sekundärbrennstoffen. Statistiken hierzu¹⁸ geben relativ

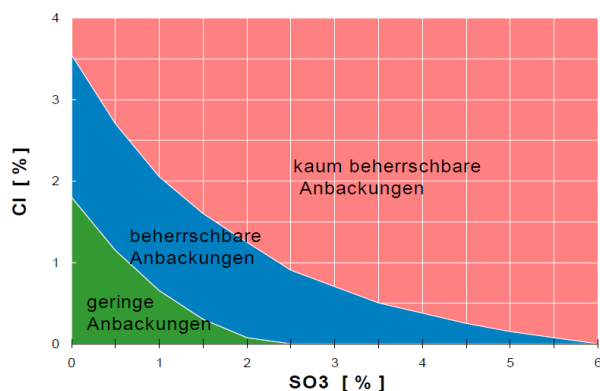


Abbildung 4: Betriebsstörung durch SO₃-Eintrag, Quelle: ¹⁸, nach VDZ-Daten

große Streubreiten der Hauptoxide an. Mitteldeutsche Aschen sind im direkten Vergleich calciumreich, Lausitzer Aschen haben dagegen die höchsten Schwefelgehalte.¹⁹ (in den untersuchten Proben lag der Schwefelgehalt der Lausitzer BFA-Asche unterhalb der Asche aus mitteldeutscher Braunkohle). BFA wird primär zu Zwecken der Rekultivierung von Tagebauten eingesetzt (Verfüllmaterial oder Meliorationsmittel).²¹ Lediglich 4 % werden anderen Verwendungen zugeführt.²⁰ Auch Braunkohleaschen reichern die Schwermetallfracht der verbrannten Kohle an. Detaillierte Daten liegen hierzu nicht vor. In ²¹ wird auf Arsen, Bor und Selen, in ²² wird speziell auf Arsen eingegangen. Ein ungeklärter Aspekt der Aschenutzung ist die Anreicherung radioaktiver Elemente in der Kohleasche (Stein- und Braunkohle). Maßgebend für den Prozess des Klinkerbrennens ist der Schwefeleintrag (siehe Abbildung 4). In Abhängigkeit des Chlorideintrages aus Ausgangs- und Brennstoffen können erhebliche Betriebsstörungen durch die Bildung des Minerals Sulfatpurrit

¹⁴ Vom Berg, Wolfgang; Lutze, Dietmar (2004): Handbuch Flugasche im Beton. Grundlagen der Herstellung und Verwendung. 1. Aufl. Düsseldorf: Verl. Bau und Technik.

¹⁵ Schöffmann, H.: Gas-Bypass-Anlagen zur Beherrschung von Chlorid-Kreisläufen im Zementwerk. Lehrstuhl für Gesteinshüttenkunde, Montanunion Loeben.

¹⁶ www.kohlestatistik.de

¹⁷ Feuerborn, Hans-Joachim (2007): Mittel- und ostdeutsche Braunkohlenflugaschen in hydraulischen Bindemitteln. 1. Aufl. Aachen: Mainz

¹⁸ VDZ: Verwertung von Braunkohleaschen. In: VDZ (Hg.): VDZ Tätigkeitsbericht 2001-2003, S. 64–66.

¹⁹ Pflug, Wolfram (1998): Braunkohlentagebau und Rekultivierung. Landschaftsökologie - Folgenutzung - Naturschutz ; mit 205 Tabellen. Berlin u.a: Springer.

²⁰ Puch, K.-H (13. und 2006): Kraftwerksnebenprodukte. BMU-Workshop zu den Anforderungen an die ordnungsgemäße und schadlose Verwertung mineralischer Abfälle. Bundesumweltministerium. Bundesumweltministerium. Bonn, 13. und 14.02.2006.

²¹ Alloway, B. J. (1999): Schwermetalle in Boden. Analytik, Konzentration, Wechselwirkungen. Berlin: Springer

(2C₂S-CaSO₄) auftreten, welches sich in Form von Anbackungen im Vorwärmer des Drehrohrofens ansammelt. Die im Rahmen des Projektes betrachteten BFA stammen vorwiegend aus dem mitteldeutschen Revier.

3.2.2. Stahlwerksschlacken



Abbildung 5: Entladung einer EOS auf der Deponie Unterwellenborn

Stahl wird maßgeblich in zwei Prozessen hergestellt, die Oxygenstahlerzeugung (Linz-Donawitz Verfahren) und die Elektrostahlerzeugung. Schlacken aus der Oxygenstahlerzeugung, sog. LD-Schlacken (LDS), bilden dabei mit einer Anfallmenge von 2,4 Mio. t/a den größeren Anteil gegenüber den Elektroofenschlacken (EOS), welche mit 1,4 Mio. t/a anfallen.²² Die Einbindung von Stahlwerksschlacken in Baustoffe erfolgt meist als Schüttgut für Tragschichten im Straßen-, Erd- und Wasserbau. Aufgrund ihrer hohen Dichte (3,6 kg/dm³ LDS; 4,2 kg/dm³ EOS aus Tabelle 2) haben sie jedoch einen begrenzten Transportradius, in welchem sie wirtschaftlich mit natürlichen Schüttgütern konkurrieren

können. Die unvollständige Nutzung im Baustoffsektor sowie Altbestände führen zu einem hohen Anteil an Deponiebeständen. Auf diesen Deponien liegen die Schlacken vorwiegend grobstückig vor, da sie unkontrolliert abkühlen und erhärten können (siehe Beispielfoto). Die sich bildende, kristalline Stückschlacke ist schwer mahlbar und weist hohe Eisen und Chromgehalte auf (siehe Tabelle 23). Eine Granulation, wie sie bei der Hochofenschlacke Stand der Technik ist, findet bei Stahlwerksschlacken aufgrund des geringen SiO₂ und sehr hoher Eisengehalte nicht statt und bedürfte einer großtechnisch schwer realisierbaren Abkühlrate. Die hohen Calciumgehalte der LD-Schlacken und der partiell ungeklärte Verwendungszweck waren Anlass für Betrachtungen der LD-Schlacken im Rahmen der Rohmehlberechnungen. Es wurde primär eine LD-Schlacke aus Duisburg intensiver betrachtet. Der Eintrag an Chrom in den Ofenzyklus wird in den Vorbetrachtungen (Rohmehlberechnungen) akzeptiert und vorerst vernachlässigt. Der Grenzwert von 2 ppm wasserlöslicher Chrom(IV) nach ²³ ist bei Einsatz von Stahlwerksschlacken jedoch nur durch eine intensive Kompensation mit Chromatreduzierer erreichbar. Neben Chrom können auch Gehalte an Molybdän oder Vanadium durch LDS eingetragen werden, welche die Emissionsgrenzwerte nach ²⁴ und ²⁵ tangieren. Nach ersten Rohmehlberechnungen soll daher die Zweckmäßigkeit des Schlackeeinsatzes abgeschätzt werden.

3.2.3. Rückstände aus thermischen Verwertungsanlagen

Die thermische Verwertung von Siedlungs- und Gewerbeabfällen ist Stand der Technik und wird flächendeckend in der BRD betrieben. Grundlage hierfür ist das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG). Die dabei anfallenden Rückstände (Aschen, Schlacken, Stäube) umfassen ein Aufkommen von 2,9 Mio. t/a. ²⁶ Diese Anfallstoffe setzen sich zu variablen Anteilen aus feinkörnigen Aschen (ca. 45 %), gesinterter, grobkörniger Schlacke (ca. 40 %), inerten Anteilen (Glas, Keramik, Steine, ca. 10 %), Metalle (ca. 5 %) und organischem Material (bis zu 2 %) zusammen.²⁷ Die eisenhaltigen Calcium-Aluminium-Silikate eignen sich im Hinblick auf den Gehalt der Hauptoxide (speziell CaO) für den Einsatz in Zementrohmehlen. Die hohe Aufkonzentration von Schwermetallen (Zink, Kupfer, Blei u.a.), PAK₁₆ und Salzen (Chloride) ²⁸ führen jedoch zum irreversiblen Eintrag von reglementierten Elementen und Substanzen im Produkt Zement und speziell im

²² Merkel, Th (2010): Das Wirtschaftsjahr 2009. Produktion und Einsatz von Hochofe- und Stahlwerksschlacke. In: FEHS – Institut für Baustoff-Forschung e. V. (Hg.): FEHS – Institut für Baustoff-Forschung e. V. (Hg.) 2010. FEHS Report. Duisburg, S. 14.

²³ Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 613, Oktober 2002: TRGS 613 - Ersatzstoffe, Ersatzverfahren und Verwendungsbeschränkung für chromathaltige Zemente und chromathaltige zementhaltige Zubereitungen.

²⁴ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen. 17. BImSchV, vom 23.11.1990.

²⁵ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft. TA-Luft.

²⁶ Zwar, H. (2005): MV-Schlacke – Mehr als nur ein ungeliebter Baustoff?, In: Müll und Abfall, Jg.: 37, Nr.3, 2005, S. 114-12

²⁷ Beck, R.; Kröger, W. (2005): Aschen aus der Müllverbrennung. Baustoff auf Deponien oder Abfall zur Ablagerung? Hg. v. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz.

²⁸ Bahadir, M.; Parlar, H.; Spittler, M. (2000): Springer Umweltlexikon. 2. Aufl. Berlin: Springer.

Prozessabgas, welche nach der 17. BImSchV sowie der TA-Luft geregelt ist. Die hierin definierten Grenzwerte werden bereits durch hohe Sekundärbrennstoffraten weitgehend ausgeschöpft.²⁹ Rückstände aus der thermischen Verwertung von Abfällen werden daher in diesem Projekt nicht explizit betrachtet. Die Analyse eines Filterstaubes in Tabelle 23 ist daher nur beispielhaft.

3.2.4. Porenbeton

Jährlich werden in Deutschland ca. 3 Mio. m³ Porenbeton produziert.³⁰ Die bei der Herstellung von Porenbeton verwendeten Ausgangsstoffe Quarzsand/-mehle, Kalk bzw. Zement, Anhydrite und Aluminium stellen eine gute Voraussetzung im Hinblick auf die chemische Eignung dar. Voraussetzung ist jedoch, dass der anfallende Porenbetonbruch in nicht verunreinigter Form vorliegt. Dies ist der Fall, wenn Abfälle aus der Produktion betrachtet werden. Hierbei kann es sich um Fehlchargen oder Verschnitt handeln. Eine genaue Anfallmenge ist gegenwärtig nicht bekannt. Nach Auskunft des Bundesverbandes der Porenbetonindustrie³⁰ ist der produktionsbedingte Abfall vernachlässigbar klein. Abfälle, welche am weichen, noch nicht erhärteten Rohmaterial entstehen, werden in den Mischprozess zurückgeführt. Abfälle am erhärteten Porenbeton dienen als Rohstoff für Granulate oder für Plansteine mit besonders niedriger Rohdichte. Bedingt durch diesen bereits optimierten Stoffkreislauf ist die Anfallmenge an nicht verunreinigtem Porenbeton eher gering einzuschätzen. Entsprechend gering ist somit auch das Einsparpotential dieses Anfallstoffes. Ein bisher nicht vollständig gelöstes Problem im Hinblick auf den Porenbeton ist die Wiederverwendung von Porenbetonabbruchs, der aus dem Abriss und Recycling von bestehenden Gebäuden entsteht. Nach dem derzeitigen Stand der Aufbereitung reichert sich der Porenbeton bevorzugt in den feinen Fraktionen des Bauschutts an und kommt somit für Einsatzzwecke wie z.B. dem Straßenbau nicht in Betracht. Aktuell sucht die PB-Industrie nach einer Verwendung für dieses RC-Material, das gegenwärtig zu 100 % deponiert werden muss. Die Porenbetonindustrie rechnet in den kommenden Jahren mit einer jährlichen Anfallmenge von 700.000 t/a an Porenbetonrecycling, welches aus dem Abbruch bestehender Gebäude entsteht. Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Probe eines Porenbetonmehls seitens der Dyckerhoff AG zur Verfügung gestellt.

3.2.5. Aschen aus Biomasseheizkraftwerken

Biomasse stellt einen wichtigen erneuerbaren Energieträger dar. Mit der Förderung dieses Energieträgers durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) nimmt Biomasse einen wichtigen Anteil zur Stromversorgung wahr. Ende des Jahres 2008 waren in der BRD über 210 Kraft- bzw. Heizkraftwerke im Leistungsbereich zwischen 120 kW_{el} und 100 MW_{el} am Netz. Die regionale Verteilung ist flächendeckend mit unterschiedlicher Anlagendichte. Entsprechend dem Anlageninput (Hackschnitzel, Pellets, Getreide, Stroh, ggf. Klärschlamm u.a.) und der Anlagengröße variieren Aschemengen und -zusammensetzung. Eine Ascheprobe wurde in das Projekt nicht einbezogen, da alle angefragten Anlagenbetreiber (z.B. Biomasse HKW Hermsdorf) die Aschemengen auf bis zu 200 t/a benannten. Diese für den Projektansatz zu geringen Mengen werden darüber hinaus vollständig in der Landwirtschaft als phosphathaltiger Dünger eingesetzt und verwertet.

²⁹ Niculae, G. (2008): Investigations on heavy metals during co-incineration. In: *ZKG International* 61 (11), S. 60–67.

³⁰ Auskunft des Bundesverbandes der PB-Industrie

3.3. Alternative Rohmehlszenarien

3.3.1. Randbedingungen der Rohmehlberechnung

Die Berechnung der einzelnen Rohmehlkomponenten nach einer klassischen Versatzrechnung, wie sie in *Seidel et. al.*⁷ u. a. beschrieben ist, ist prinzipiell möglich. Die Zielstellung des Projektes, mehrere Anfallstoff elementspezifisch zu kombinieren, erschwert eine Trennung in Al-, Fe-, und Si-Träger. Die Rohmehle wurden daher in einem Iterationsverfahren (Newton-Verfahren) unter folgenden Randbedingungen berechnet.

ZIELFUNKTION: minimaler Anteil Kalksteinmehl im Rohmehl

ROHMEHLKENNWERTE: $94,5 \leq \mathbf{KSt\ I} \leq 100$
 $2,7 \leq \mathbf{SM} \leq 3,2$

VERFÜGBARKEIT:

Unter Berücksichtigung der jährlichen Klinkerproduktion pro Ofenlinie und der recherchierten Menge des Anfallstoffes ergeben sich maximale, spezifische Anteile des Anfallstoffes bei angestrebter kontinuierlicher Produktion. Die für die betrachteten Anfallstoffe ermittelten Grenzwerte sind in Tabelle 3 aufgezeigt. Die Braunkohleaschen, wie auch die Stahlwerksschlacken liegen mit Bezug auf das Referenzwerk in ausreichender Menge vor. Der Porenbeton wurde in den Berechnungen auf max. 5 % begrenzt, da die Anfallmengen des Porenbetongranulates nicht quantifiziert werden konnten.

Tabelle 3: Begrenzung der Einsatzmenge im Rohmehl

Anfallstoff	theor. Grenzwert der Einsatzmenge in der Rohmehlberechnung
BFA Schwarze Pumpe	35,0 %
BFA Schkopau	35,7 %
BFA Lippendorf	71,4 %
LD-Schlacke	100 %
Porenbetonmehl	5 % *

MINERALPHASENBESTAND

Der sich aus der berechneten Klinkerzusammensetzung nach BOUGE bzw. TAYLOR ergebende Mineralphasenbestand diente zur Kontrolle des Kriteriums „Portlandzementklinker“. Abdriftende Klinkerzusammensetzungen mit Tendenz zu sog. HS-Klinkern o. a. konnten so ausgegrenzt werden.

SO₃- UND MgO-Gehalt

Der Rechenweg erlaubt die Begrenzung einzelner Oxide im Rohmehl. Der SO₃-Eintrag im Rohmehl wurde so auf ≤ 2,5 % und der MgO-Gehalt im Klinker (berechnet als glühverlustfreies Rohmehl) auf 5,0 % gemäß³¹ begrenzt.

* getroffene Annahme, keine konkreten Anfallmengen zur Verfügung

³¹ DIN EN 197-1, 08-2004: Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normzement.

3.3.2. Eingegrenzte Rohmehlszenarien.

Mit Bezug auf die in Abschnitt 2.2, Tabelle 1 und 2, gegebenen Referenzwerte wurden nachstehende Rohmehlszenarien diskutiert. In allen Szenarien wird der Kalkstandard KSt I auf 94,5 festgesetzt. Mit Ausnahme des Szenarios 1 wird auch der Silikatmodul als konstante Größe mit dem Wert 2,7 betrachtet.

Der in den Szenarien 1 bis 4 aufgezeigte Phasenbestand bezieht sich auf die glühverlustfreie Zusammensetzung der Rohmehle (theor. Chem. Zusammensetzung der Klinker). Anteile an Freikalk sowie flüchtige Elemente sind in diesem Vergleich unberücksichtigt.

Szenario 1: Variation des Silikatmoduls:

Der Silikatmodul, definiert als $SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$, beeinflusst maßgeblich den Anteil an Kalksteinmehl im Rohmehl, bei konstantem Kalkstandard. Die Silikatmoduli inländischer Klinker liegen zwischen 2,3 und $\geq 3,0$. Der Bezugswert im Referenzmehl liegt bei 3,2. Dieser sehr hohe Wert erlaubt nur sehr geringe Einsparmöglichkeiten bzgl. der rohstoffbedingten CO₂ – Emission (-7 % Kalksteingehalt bei Zusammensetzung nach Tabelle 4). Tabelle 4 zeigt die Abstufung des Kalksteingehaltes im Rohmehl in Abhängigkeit eines variierenden Silikatmoduls. Eine Absenkung des SM auf 2,3 erlaubt somit eine Reduzierung des Kalksteingehaltes um bis zu 14 %.

Tabelle 4: Szenario 1 - Variation des Silikatmoduls

Nr.	Rohstoffe				Moduli			theor. Phasenbestand nach Bouge			
	Kalkstein	BFA Schkopau	Sand 1	Poren-betonmehl	KSt I	SM	TM	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
1.1	75,25 %	16,29 %	3,43 %	5,00 %	94,5	2,3	1,9	55,6	18,4	10,7	9,5
1.2	77,17 %	13,75 %	4,08 %	5,00 %	94,5	2,5	2,0	57,4	18,2	10,2	8,8
1.3	78,80 %	11,55 %	4,65 %	5,00 %	94,5	2,7	2,0	59,0	18,0	9,8	8,1
1.4	80,23 %	9,62 %	5,14 %	5,00 %	94,5	2,9	2,1	60,4	17,8	9,4	7,5
-	82,06 %	7,16 %	5,78 %	5,00 %	94,5	3,2	2,1	62,3	17,6	9,0	6,8

Szenario 2: Variation des Porenbetongehaltes:

Das Szenario 2 zeigt die theoretischen Grenzen der Kalksteinsubstitution unter Verwendung der ausgewählten Anfallstoffe auf, in dem es die Verfügbarkeit der Rohstoffe (speziell des Porenbetons) vernachlässigt. Unter Beibehaltung der definierten Moduli (KSt I = 94,5 und SM = 2,7) ergibt sich ein maximaler Substitutionsgrad von 15 %. Dieser Wert ist nahe am Szenario 1.1, welches unter Berücksichtigung der verfügbaren Mengen 14 % Kalkstein substituieret.

Tabelle 5: Szenario 2 - Variation des Porenbetongehaltes

Nr.	Rohstoffe				Moduli			theor. Phasenbestand nach Bouge			
	Kalkstein	BFA Schkopau	Sand 1	Poren-betonmehl	KSt I	SM	TM	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
2.1 = 1.3	78,80 %	11,55 %	4,65 %	5,00 %	94,5	2,7	2,0	59,0	18,0	9,8	8,1
2.2	76,50 %	11,50 %	2,00 %	10,00 %	94,5	2,7	2,0	59,0	18,0	9,8	8,1
2.3	74,77 %	11,46 %	0,00 %	13,77 %	94,5	2,7	2,0	58,9	17,9	9,8	8,1

Szenario 3: Einsparpotential durch Stahlwerksschlacke

Die Einbindung einer Stahlwerksschlacke (LD-Schlacke) in den bis dato bestehenden Rohmehlmix aus Kalkstein, BFA, Sand und PBM führt trotz des hohen CaO-Anteils der Schlacke – bei konstanten Moduli – nicht zu einer weiteren Reduzierung des Kalksteinmehlgehaltes. Dies begründet sich durch den hohen und zusätzlichen Eintrag an Eisen. Unter Verwendung der Zielfunktion und Randbedingung aus Kapitel 3.3.1 reicht der

Eiseneintrag der BFA (7,8 % Fe₂O₃) sowie die geringen Anteile aus Kalkstein (1,0 %) und Porenbeton (1,0 %) aus, um die für Portlandzement typischen Gehalte der Ferritphase zu erzielen. Die typische Zusammensetzung des C₄AF entspricht nach ³² etwa 46 % CaO und 33 % Fe₂O₃. Diese Verhältnisse werden annähernd auch in der LD-Schlacke erreicht (siehe Tabelle 23). Ein zusätzlicher Eintrag von LD-Schlacke hebt dadurch lediglich den C₄AF-Gehalt im Klinker an, ohne dabei den Kalksteingehalt wirksam zu reduzieren. Eine Einbindung der LD-Schlacke ohne gleichzeitige Verwendung der BFA ist möglich, führt jedoch nicht zu höheren Substitutionsraten als die in Tabelle 4 und Tabelle 5 dargelegten Werte. Zudem verschiebt sich der Phasenbestand stark hin zu einem HS-Klinker, was von den Projektzielen abweicht.

Tabelle 6: Szenario 3 - Einsparpotential durch Stahlwerksschlacke

Nr.	Rohstoffe					Moduli			theor. Phasenbestand nach Bouge			
	Kalkstein	BFA	Sand 1	Porenbeton	LD-Schlacke	KSt I	SM	TM	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
3.1	79,10 %	9,99 %	4,91 %	5,00 %	1,00 %	94,5	2,7	1,8	60,0	17,4	8,9	8,8
3.2	79,68 %	6,89 %	5,43 %	5,00 %	3,00 %	94,5	2,7	1,4	61,9	16,2	7,0	10,2
3.3	80,27 %	3,78 %	5,96 %	5,00 %	5,00 %	94,5	2,7	1,1	63,8	15,0	5,1	11,6
-	80,98 %	-	6,59 %	5,00 %	7,43 %	94,5	2,7	0,9	66,2	13,5	2,7	13,3

Szenario 4: Vergleich von BFA-Qualitäten

Im Projektzeitraum wurden zwei mitteldeutsche Aschen sowie eine Asche aus dem Lausitzer Revier betrachtet. Die qualitativ und logistisch bevorzugte Asche entstammt dem Kraftwerk Schkopau. Das Kraftwerk, bestehend aus 2 Blöcken, leistet 916 MW_{el} sowie 110 MW Einphasen-Bahnstrom und bezieht primär Braunkohle aus der Umgebung von Zeitz, speziell aus dem Tagebau Profen. Unwesentlich weiter entfernt liegt das Kraftwerk Lippendorf, welches mit 1867 MW_{el} deutlich größer bemessen ist. Es bezieht die Braunkohle aus dem Tagebau Schleenhain. Neben der Braunkohle werden in Lippendorf auch Sekundärbrennstoffe eingesetzt, vorwiegend Klärschlamm, was sich im Phosphatgehalt der Asche (siehe Tabelle 23) wieder spiegelt. Die dritte betrachtete Asche entstammt dem KW Schwarze Pumpe, einem 1600 MW_{el} Braunkohlekraftwerk, welches mit Rohbraunkohle aus dem Tagebau Welzow Süd gespeist wird. Die Betrachtung der Lausitzer Asche soll die prinzipielle Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Standorte darstellen.

Tabelle 7 legt dar, dass das Einsparpotential der verschiedenen Braunkohleaschen auf einem vergleichbaren Niveau liegt, wobei ein höherer Asche- nicht automatisch einem geringeren Kalksteingehalt entspricht. Unterschiede treten jedoch beim eingetragenen SO₃-Gehalt der Aschen auf, welcher aus Gründen des Betriebsablaufes eine begrenzende Größe darstellen könnte (siehe Abbildung 4).

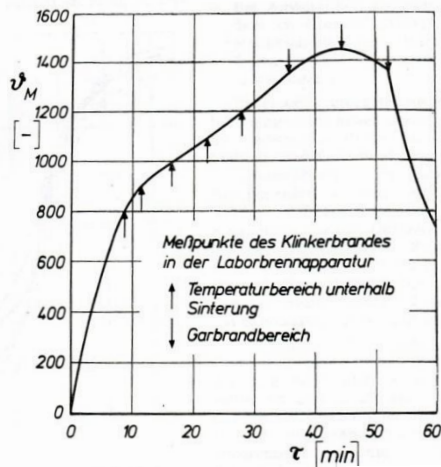
Tabelle 7: Szenario 4 - Vergleich von BFA-Qualitäten

Nr.	Rohstoffe						Moduli			SO ₃	theor. Phasenbestand nach Bouge			
	Kalkstein	BFA Schkopau	BFA Lippend.	BFA Schw. P.	Sand 1	PBM	KSt I	SM	TM		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
4.1 = 1.3	78,80 %	11,55 %	-	-	4,65 %	5,00 %	94,5	2,7	2,0	1,99	59,0	18,0	9,8	8,1
4.2	79,46 %	-	12,71 %	-	2,83	5,00 %	94,5	2,7	2,8	1,69	56,7	19,5	12,2	6,4
4.3	80,32 %	-	-	12,14 %	2,54 %	5,00 %	94,5	2,7	2,4	1,55	58,2	18,9	11,2	7,3

³² Taylor, H. F. W. (1997): Cement chemistry. 2nd. London: Thomas Telford Publishing.

4 Brennversuche

4.1. Laborbrennversuche



Die in Abschnitt 3.3.2 eingegrenzten Rohmehle wurden in einem dynamischen Laborbrennverfahren auf ihre Reaktivität (Brennbarkeit) getestet. Das Heiz- und Verweilregime basiert dabei auf großtechnischen Material- und Verweilzeitmessungen. Das Brennregime ist in Abbildung 6 dargestellt und in einen Niedertemperatur- und einen Hochtemperaturbereich (Garbrandbereich) untergliedert. Das Funktionsprinzip basiert auf dem gesteuerten Ein- und Ausfahren der Rohmehlprobe in den Gradientenofen. Die Ofenatmosphäre entspricht mit 30 Vol.% CO₂ praxisähnlichen Bedingungen. Bewertungskriterium ist der Kalkbindungsgrad K', der sich aus dem nasschemisch bestimmten Freikalkgehalt (Methode nach Franke) und dem Glühverlust wie folgt ergibt:

Abbildung 6: Temperaturregime der Laborbrennversuche nach (6)

$$K' = \frac{CaO_0 - CaO_{CaCO_3} - CaO_{frei}}{CaO_0} \quad \text{aus (8)}$$

Die quantitative Rohmehlreaktivität ergibt sich aus der Summation der K'-Werte für den Niedertemperatur- sowie für den Garbrandbereich. Der IBU-tec advanced materials AG liegen auf Basis einer Vielzahl von untersuchten Rohmehlen langjährige Erfahrungen vor, aus welcher sich folgende Reaktivitätsklassen ableiten lassen:

Tabelle 8: Reaktivitätsklassen nach ³³

Reaktivität	Niedertemperaturbereich	Garbrandbereich
	$\Sigma K'_1 [-]$	$\Sigma K'_2 [-]$
sehr gut	> 1,85	> 2,90
gut	1,85 ... 1,35	2,90 ... 2,70
mittel	1,35 ... 0,85	2,70 ... 2,50
mäßig	0,85 ... 0,35	2,50 ... 2,30
schlecht	< 0,35	< 2,30

Alle Rohmehlszenarien wurden der Reaktivitätsbewertung unterzogen. Als Vergleichswert der Brennbarkeit dienten hierfür die Reaktivitätskennwerte des Ofenmehls aus dem Referenzwerk. Die mäßige Reaktivität des Vergleichsmehles im Garbrandbereich resultiert aus dem eingestellten Silikatmodul von 3,2. Mit steigendem Silikatmodul wird die Brennbarkeit eines Ofenmehles erschwert. Die Ergebnisse der Reaktivitätsbewertungen sind in Tabelle 9 dargestellt. Tendenziell zeigen alle alternativen Mehle der Szenarien 1 bis 4 vergleichbare, z.T. verbesserte Brennbarkeiten.

³³ IBUtec advanced materials AG: Reaktivitätsuntersuchung am Rohmehl. interne Arbeitsvorschrift. Hg. v. IBUtec advanced materials AG. Weimar.

Tabelle 9: Ergebnisse der Reaktivitätsuntersuchungen der eingegrenzten Szenarien aus Abschnitt 3.3.2

Szenario	Σ K1	Σ K2	Bewertung	
			Niedertemperaturbereich	Garbrandbereich
Referenz 1	1,47	2,33	Gut	Mäßig
Referenz 2	1,47	2,41	Gut	Mäßig
Referenz 3	1,47	2,36	Gut	Mäßig
1.1	2,06	2,60	Sehr gut	Mittel
1.2	1,59	2,57	Gut	Mittel
1.3	1,71	2,53	Gut	Mittel
1.4	1,72	2,45	Gut	Mäßig
2.2	2,08	2,54	Sehr gut	Mittel
2.3	1,49	2,12	Gut	Schlecht
3.1	1,62	2,37	Gut	Mäßig
3.2	1,66	2,52	Gut	Mittel
3.3	1,40	2,37	Gut	Mäßig
4.2	1,66	2,52	Gut	Mittel

Begleitende statische Brennversuche zeigen beispielhaft in Abbildung 7 die Entwicklung des Mineralphasenbestandes der Vorzugsvariante 1.3 (Eingrenzung in Abschnitt 4.2) im Vergleich zum Referenzmehl. Der Phasenbestand weicht hierbei bedingt durch veränderte die Brennbedingungen von den Referenzdaten ab. Beide Rohmehle konnten in einem Brennvorgang nicht vollständig umgesetzt werden. Speziell der CaO_{frei}-Gehalt spiegelt keine praxisnahen Werte wieder. Zur Bewertung des Phasengehaltes bei vollständigem Umsatz wurden beide Mehle einem zweiten Brand unterzogen. Die Ergebnisse, die in Abbildung 8 dargestellt sind, zeigen den Einfluss des erhöhten BFA-Gehaltes auf.

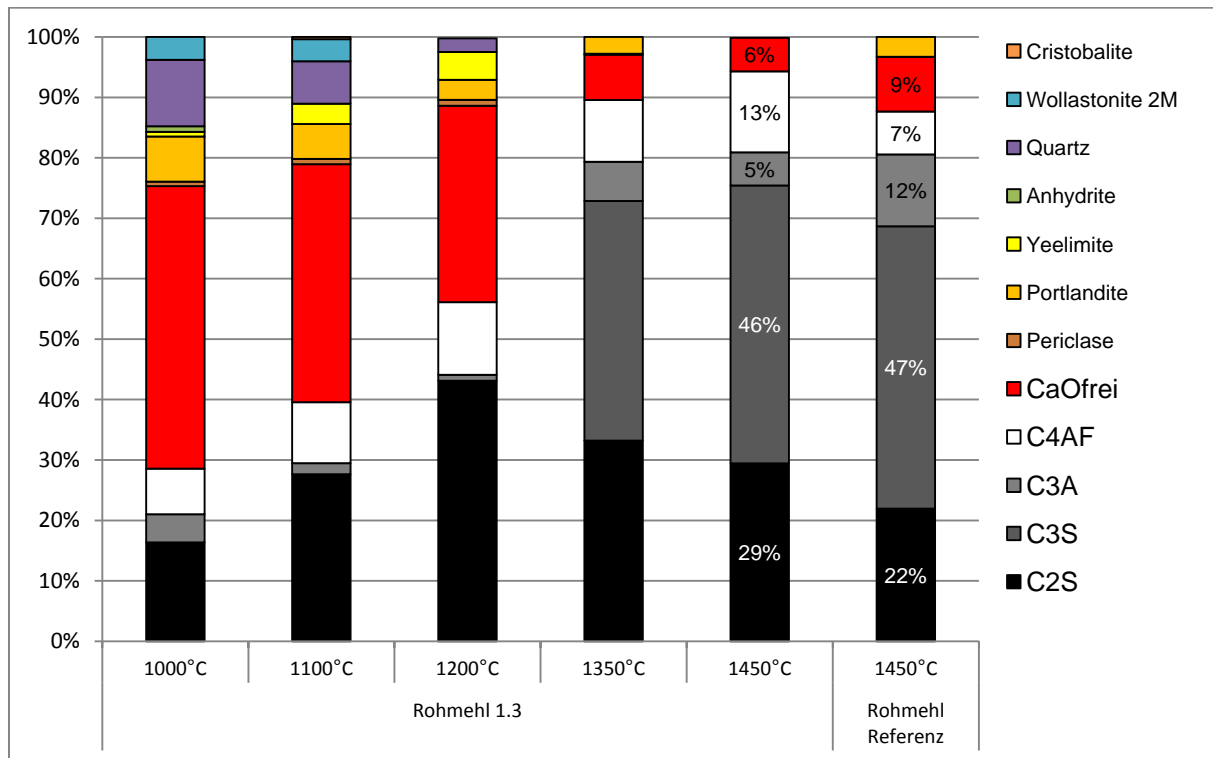


Abbildung 7: Entwicklung des Mineralphasenbestandes an statischen Brennversuchen

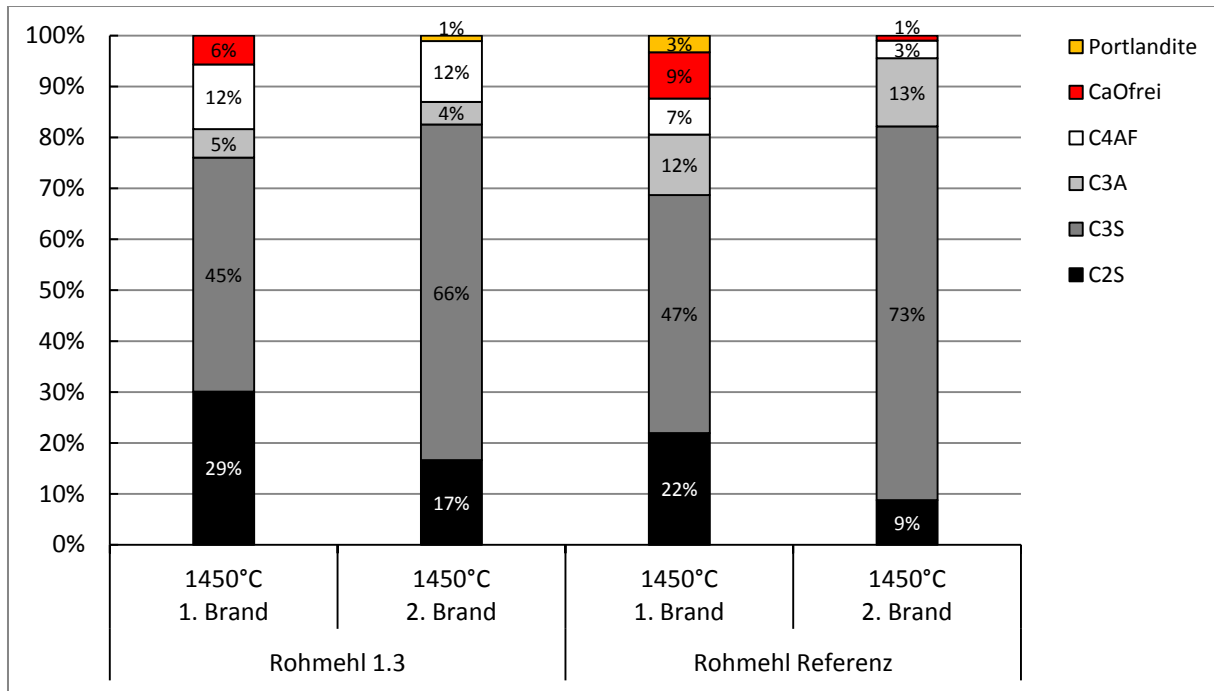


Abbildung 8: vollständiger Brand beider Rohmehle

Der Gehalt von 11,55 % BFA im Rohmehl und der damit verbundene Eiseneintrag führen zu einer Verschiebung des Mineralphasenbestandes mit Tendenz zu mehr Ferritphase (C₄AF). Der entsprechende Verbrauch des Calciums geht dabei zu Lasten der reaktiveren Alit- (C₃S) und Aluminatphase (C₃A). Aus Tabelle 23 ist zu entnehmen, dass der Fe₂O₃-Gehalt der bevorzugten BFA etwa doppelt so hoch ist, wie der Gehalt anderer Aschen. Bei Verwendung der Braunkohleasche aus Lippendorf oder Schwarze Pumpe ist dieser Trend zum HS-Klinker nicht zu erwarten.

4.2. Bewertung bisheriger Kriterien und Auswahl einer Vorzugsvariante

Unter Berücksichtigung der Kriterien aus den Abschnitten 3.1 bis 3.3, den Reaktivitätsbewertungen der alternativen Rohmehle aus Abschnitt 4.1 sowie der ganzheitlichen Bilanzierung aus Abschnitt 6.2. grenzt sich die Vorzugsvariante auf das **Szenario 1.3** ein. Dies begründet sich dadurch, dass Braunkohleflugaschen in der Summe der Kriterien das höchste Einsparpotential bietet. Der stofflich besser geeignete Porenbeton suggeriert zwar deutlich höhere Substitutionsraten, ist aber aufgrund der unklaren Anfallmengen quasi nicht verfügbar. Stahlwerksschlacken können, wie in Abschnitt 3.3.2, Tabelle 6 gezeigt - auch unter theoretischer Vernachlässigung der problematischen Schwermetallsituation - keine nennenswerten Substitutionsraten generieren. In der Summe der Kriterien stellen die Braunkohleaschen den Anfallstoff mit den höchsten Perspektiven auf eine kontinuierliche CO₂-Emissionseinsparung dar. Die hier eingegrenzte Vorzugsvariante 1.3 wird daher in einem weiteren Schritt in einem halbertechnischen Brennversuch bewertet (Abschnitt 4.3).

4.3. Halbtechnische Brennversuche

Nach Ausarbeitung der Vorzugsvariante wurde der Klinkerbrand in einem direkt beheiztem Drehrohrofen (GDO) l=12 m, d=1,0 m, getestet. Der Drehrohrofen wurde mit Erdgas beheizt. Die Materialführung erfolgte im Drehrohrofen im Gegenstrom zur Gasführung. In einem Drehrohrkühler wurde der Klinker abgekühlt. Die heiße Kühlerabluft wird dem Ofen als Sekundärluft zugeführt. In Abbildung 9 ist das Schema der Ofenanlage dargestellt.

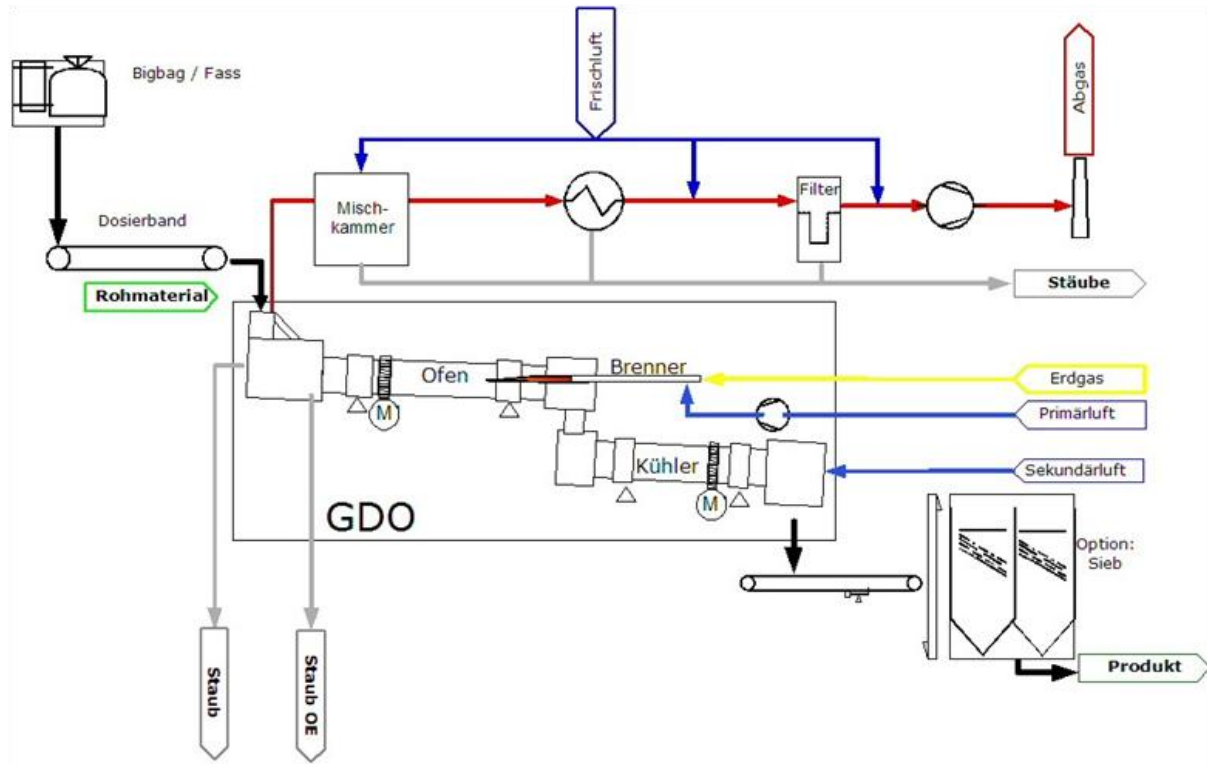


Abbildung 9: Arbeitsschema GDO

Die Zielstellungen des halbtechnischen Brennversuches waren:

- Simulation von großtechnischen Einflüssen eines industriellen Drehrohrofens in kleinerem, technischen Maßstab,
- Herstellung einer repräsentativen Menge an Zementklinker für Zement-, Mörtel- und Betonuntersuchungen in Anlehnung an den industriellen Prozess.

Die für die Durchführung der Brennversuche notwendige Mengen (ca. 20 t Rohmehl) weichen stark von den bis dato untersuchten Labormengen ab. Die nach Bereitstellung der Ausgangsstoffe durchgeführten Analysen (siehe Kapitel 2.1) wurden in die Versatzrechnung einbezogen. Daraus ergeben sich folgende, geänderte Zusammensetzungen des Vorzugsszenarios (Tabelle 10).

Tabelle 10: Variation des Vorzugsszenarios 1.3 durch Wechsel der Lieferchargen

	KSM	BFA	PBM	Sand 1
Vorversuche	78,80	11,55	5,00	4,65
GDO-Versuch	79,50	12,14	5,00	3,36

Aus den vier Komponenten Kalksteinmehl, Braunkohlenflugasche „Schkopau“, Porenbetonmehl und Quarzsand wurde die alternative Rohmischung 1.3 hergestellt. Soweit diese Stoffe nicht in der erforderlichen Feinheit

vorlagen wurden diese vorab getrennt vermahlen und homogenisiert. Um Brennprozess und Zementqualität der alternativen Rohmischung mit dem herkömmlichen Verfahren vergleichen zu können wurde der Brennversuch auch mit einem industriellen Referenzmehl durchgeführt. Die Ofenanlage verfügte zum Zeitpunkt des Brennversuches über keinen Wärmetauscher. Um eine Entmischung durch selektiven Staubaustrag zu verhindern, wurden die Rohmischungen granuliert. Der Klinkerbrand erfolgte somit im Halbtrockenverfahren.

Der geringere Energiebedarf und die bessere Reaktivität der alternativen Rohmischung im Vergleich zum Referenzmehl konnten mit dem halbertechnischen Brennversuch bestätigt werden.

Die bessere Brennbarkeit der alternativen Mischung ist in Abbildung 10 am geringeren spezifischen Energiebedarf (Energieverluste) für das Abgas und die Wandwärme zu erkennen.

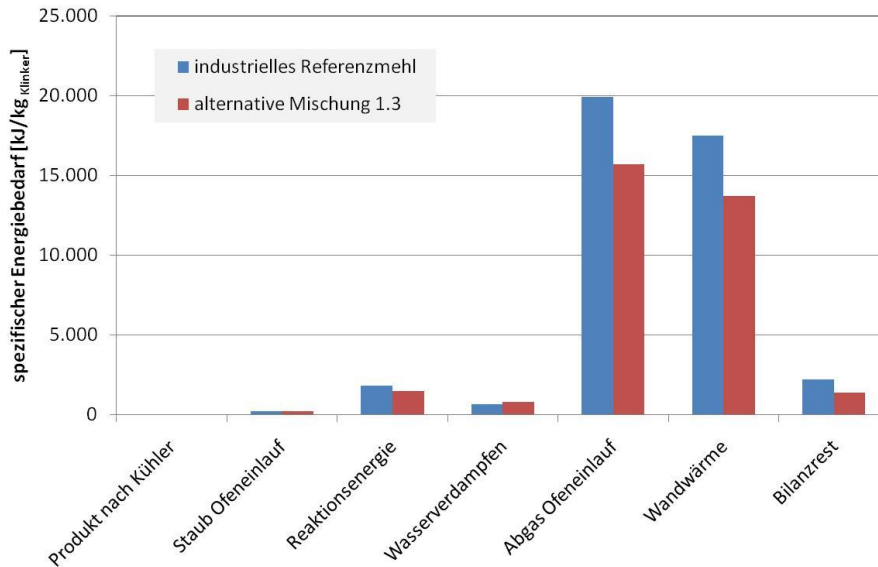


Abbildung 10: spezifischer Energiebedarf der Klinker im halbertechnischen Brennversuch

Die schlechtere Brennbarkeit des industriellen Referenzmehl spiegelte sich auch in der Konzentration des Freikalkes im Klinker wieder. Während bei der alternativen Mischung Werte von 0,5 % bis 1,1 % erreicht wurden, lagen sie trotz höherer Brenntemperaturen beim Referenzmehl bei 2 % bis 7 %. Für die Zement-, Mörtel- und Betonuntersuchungen mit industriellem Klinker war daher ein zweiter Brennprozess erforderlich. Der Brennstoffbedarf war beim Brand von Klinker mit der alternativen Mischung etwa 20 % geringer als beim Klinkerbrand mit dem Referenzmehl. Bei industriellen Anlagen ist eine geringere Brennstoffeinsparung zu erwarten, da das Ofenabgas zur Vorwärmung genutzt wird und der Anteil des Wärmeverlustes durch die Wand am Energiebedarf geringer ist. Die spezifische CO₂ Menge im Ofenabgas war beim Brand mit der alternativen Mischung um 0,34 kg_{CO2} / kg_{Klinker} geringer als beim Brand mit der Referenzmischung.

Emissionen

Um die Auswirkung der geänderten Rohmehlmischung auf die Emission abschätzen zu können wurden für beide Versuchsbrände in Anlehnung an §5 „Anforderungen an Verbrennungsanlagen“ der 17. BImSchV Emissionsmessungen durchgeführt. Bei den Messungen wurde festgestellt, dass der Gewebefilter beschädigt war, was zu sehr hohen Staubkonzentrationen führte. Die Messwerte in Tabelle 11 und Tabelle 12 sind auf eine Sauerstoffkonzentration von 11 % bezogen.

Tabelle 11: Emissionen in halbtechnischen Brennversuch

		Grenzwert 17. BImSchV	M1.3	Referenz
Klinker	kg/h		89	98
Gesamtstaub	mg/m ³	30	15.800	2.790
C _{ges}	mg/m ³	20	< 8	< 7
Chlorwasserstoff	mg/m ³	60	1,7	< 1,7
Fluorwasserstoff	mg/m ³	4	< 1,4	< 1,7
SO ₂	mg/m ³	200	121	< 12
NO ₂	mg/m ³	400	1.050	521
CO	mg/m ³	100	< 13	34

Aufgrund des hohen SO₃ Eintrages mit der Braunkohlenflugasche war die SO₂- Konzentration der alternativen Mischung höher. Bei einer Anlage mit Wärmetauscher wird ein Großteil des SO₂ im Wärmetauscher am Rohmehl adsorbiert. Die Ursache für die höhere NO₂- Konzentration beim Klinkerbrand mit der alternativen Mischung 1.3 kann nicht eindeutig geklärt werden. Sie lag in der Größenordnung der NO₂- Konzentration im Drehofenabgas vor der NO_x- Minderung bei herkömmlichen Zementdrehöfen. Bei den an Partikeln haftenden Stoffen wurde die Konzentration umgerechnet auf eine Staubkonzentration von 20 mg/m³ (siehe Tabelle 11).

Tabelle 12: Analyse des Prozessstaubes im halbtechnischen Brennversuch

		Grenzwert 17. BImSchV	M1.3	Referenz
Klinker	kg/h		89	98
Summe PCDD/DF	ng/m ³	0,01	<0,001	<0,001
Hg	mg/m ³	0,05	<0,002	<0,002
Summe Cd, Ti	mg/m ³	0,05	0,004	0,001
Summe Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V	mg/m ³	0,5	0,031	0,016
Summe As, Benzo(a)pyren, Cd, Co, Cr	mg/m ³	0,5	0,004	0,003

Die Werte sind deutlich unter den Grenzwerten der 17. BImSchV §5.

Auswirkung des höheren SO₃ – Eintrages

Neben den Zementbestandteilen CaO, Al₂O₃, SiO₂, Fe₂O₃ sind andere Stoffe zu berücksichtigen die Einfluss auf Zementqualität und Brennprozess haben. Zu diesen Stoffen gehört SO₃. Durch den Prozess SO₃ Freisetzung in der Sinterzone des Drehrohrofens und Kondensation an Mehl in kälteren Anlagenteilen und Transport in die Sinterzone entsteht ein Kreislauf in dem sich SO₃ anreichert. Dieses kann zu Komplikationen führen und erfordert technologische und konstruktive Maßnahmen (siehe Abbildung 4, Seite 13).

In der alternativen Mischung ist die SO₃-Konzentration deutlich höher als im Referenzmehl. In der Braunkohlenflugasche sind ca. 7 % bis 9 % SO₃ enthalten. Wie in Abbildung 11 ersichtlich führte der höhere SO₃-Eintrag zu einer höheren SO₃-Menge im Klinker und im Abgas.

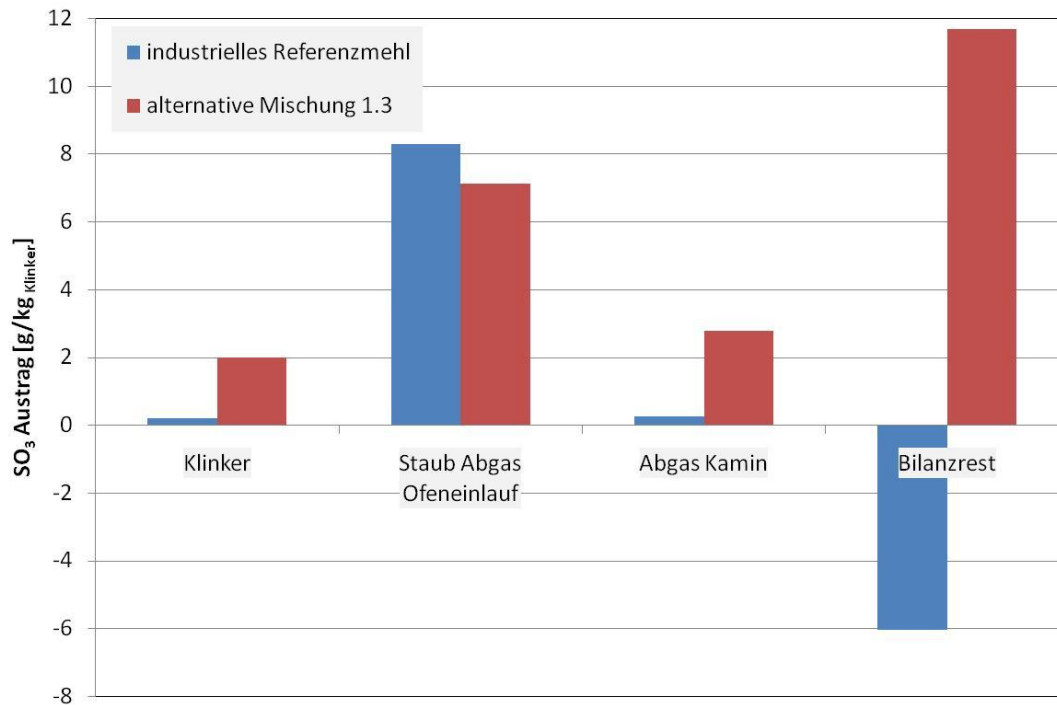


Abbildung 11: Einfluss SO₃-Eintrag

Die Kreislaufproblematik spiegelt sich in den hohen Bilanzresten wieder. Während bei der alternativen Mischung weniger SO₃ mit Klinker, Staub und Abgas ausgetragen wurde als mit dem Rohmehl eingetragen wurde war es beim Versuch mit dem SO₃-ärmeren industriellen Referenzmehl anders herum. Beim Versuch mit der alternativen Mischung, der vor dem Versuch mit dem Referenzmehl stattfand, reicherte sich der Kreislauf noch mit SO₃ an und baute sich dann beim unmittelbar folgenden Versuch mit dem Referenzmehl ab.

5 Bewertung der Klinkerqualität

5.1. **Aufbereitung der Klinker**

Beide Klinker lagen nach dem Brennen als Granulat vor. Die Granalien sind dabei bedingt durch das Herstellungsverfahren deutlich kleiner als ein großtechnisch gebrannter Klinker. Ohne den Zwischenschritt des Brechens wurden beide Klinker in einer Kreislaufmahanlage auf Zementfeinheit gemahlen. Aus einer selektierten Auswahl des Brenngutes (Kriterium Freikalk) wurden Klinkermehle für Mörtel- und Betonversuche hergestellt. Die erzielten Mahlfeinheiten sind in Tabelle 13 dargestellt. Beide Klinker zeigten in der Mahlanlage starke Verpelzungen der Gattierungen sowie Anhaftungen im Windsichter. Dieses Problem trat in nahezu gleichem Umfang an beiden Klinkern (Alternativ und Referenz) und wurde durch Zugabe einer konstanten Menge an Diethylenglycol (DEG) kompensiert. DEG wird großtechnisch als Mahlhilfe für Portlandzemente eingesetzt. Es reduziert die Oberflächenenergien des Pulvers und vermindert so störende Anbackungen. Im Gegensatz zu anderen Wirkstoffen zeigt DEG keine signifikanten Auswirkungen auf die Hydratation des damit hergestellten Zementes.³⁴



Abbildung 12: Klinkergranalien nach GDO

³⁴ Dressel, D.; Stark, J. (2010): Modern grinding aids and their influence in the hydraulic properties of GBFS. In: ZKG International 63 (2), S. 43–54.

Tabelle 13: Mahlfeinheiten der gebrannten Klinker

Klinker	Mahlfeinheit	Toleranz	SO ₃ -Gehalt Klinker	Ø SO ₃ -Gehalt Laborzement
	cm ² /g	cm ² /g	M. %	M. %
Klinker 1.3	4.600	200	0,0 – 0,4	2,1
Klinker Referenz	4.900	300	0,0 – 0,1	3,4

Im Gegensatz zu industriellen Mahlanlagen wurde der für die Verarbeitbarkeit notwendige Abbinderegler erst nach der Mahlung durch Homogenisieren von Teilchargen zugegeben. Diese Abweichung vom praxisüblichen Mahlvorgang liegt primär in der Betriebstemperatur der Mühle begründet, welche mit ca. 40°C deutlich unterhalb großtechnischer Mahlanlagen liegt und für eine partielle oder vollständige Dehydratisierung des Gipses nicht ausreichend ist. Als Abbinderegler wurde eine Abmischung aus Anhydrit und Calciumsulfathalhydrat im Verhältnis 1:1 gewählt

5.2. Chemische und mineralogische Anforderungen

Die chemischen Analysen beider Klinker sind in Tabelle 14 gegeben. Beide Klinker entsprechen der typischen Zusammensetzung eines Portlandzementklinkers. Die Unterschiede in den Silikatmoduli spiegeln sich im Calciumgehalt der Klinker wieder, speziell unter Berücksichtigung des noch ungebundenen, freien Calciumoxides. Der CaO_{frei}-Gehalt des Referenzklinkers liegt oberhalb von großtechnisch realisierbaren Werten (siehe 4.3). Der KSt I des alternativen Klinkers wurde nur knapp verfehlt (Zielwert 94,5). Diese Variation ist primär in der Schwankungsbreite der Ausgangsstoffe, speziell der BFA (siehe Abbildung 2, Seite 10) zu sehen. Tabelle 14 zeigt zudem die gute Übereinstimmung zwischen der Versatzrechnung aus Abschnitt 3.3 und der Zusammensetzung der halbtechnisch gebrannten Klinker.

Tabelle 14: Chemische Analyse der halbtechnischen Klinkerbände

		GV ₁₀₀₀ *	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	CaO _{frei}	MgO	TiO ₂	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	KSt I	SM	TM
Berechnung nach 3.3.1	Klinker 1.3	-	21,8	5,4	2,7	65,0	-	1,6	0,15	0,03	0,89	0,32	2,91	0,09	94,5	2,7	2,0
		1,1	21,8	5,5	2,6	64,6	1,4	1,9	0,25	0,05	0,20	0,16	0,3	0,03	93,7	2,7	2,1
Analyse	Klinker Referenz	1,0	21,5	5,0	2,1	66,0	2,7	2,8	0,19	0,03	0,13	0,13	0,1	0,03	98,3	3,0	2,4

An beiden Klinkern wurde im halbtechnischen Brennversuch ein vergleichbarer Alite-Gehalt erzielt (Tabelle 15). Durch den unvollständigen Umsatz des CaO_{frei} weichen die Mineralphasenbestände von denen in Abbildung 8 ab. An großtechnischen Drehrohröfen ist, bei geringerem CaO_{frei}-Gehalt an beiden Klinkern ein höherer Alite-Gehalt zu erwarten.

Die Tendenz zu mehr Calciumaluminatferrite durch den Eiseneintrag der BFA Schkopau (Abschnitt 4.1) wird auch im halbtechnischen Brennversuch bestätigt.

Tabelle 15: Mineralphasenbestand nach QXRD

	Alite	Belite	Aluminatphase	Ferritphase	CaO _{frei}	Periclas
Klinker 1.3	58,2	20,0	9,9	9,9	0,8	-
Referenz	60,8	15,6	10,0	6,8	2,9	2,1

5.3. Mechanische Anforderungen

Mechanische Kennwerte im Sinne der DIN EN 197-1 beziehen sich auf die Normdruckfestigkeit (Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen) sowie die Anfangsfestigkeit (bei Portlandzementen nach 2 Tagen). Beide Kennwerte wurden nach DIN EN 196-1 bestimmt. Nach den in Abbildung 13 und Abbildung 14 aufgezeigten Ergebnissen lassen sich beide Zemente bzgl. Ihrer Festigkeitsentwicklung in die Festigkeitsklasse 52,5 R einordnen. Zemente

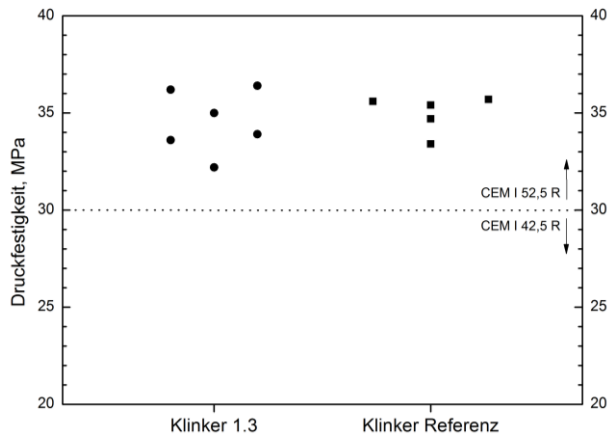


Abbildung 13: Streuung der Frühfestigkeiten

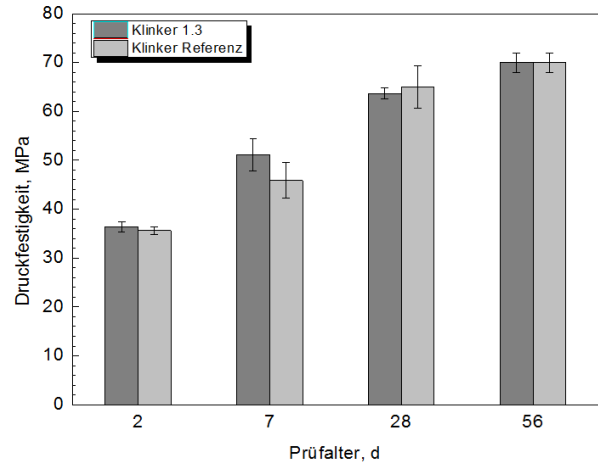


Abbildung 14: Festigkeitsentwicklung nach DIN EN 196-1

dieser Festigkeitsklasse kennzeichnen sich durch hohe Früh- und Endfestigkeiten aus und werden primär im Bereich von Betonfertigteilen eingesetzt. Im direkten Vergleich beider Portlandzemente sind keine grundlegenden Unterschiede im Erhärtungsverlauf messbar. Die im Vergleich zu Industriezementen größeren Schwankungen bei Wiederholversuchen treten bei allen Zementen gleichermaßen auf und sind als Resultat des halbertechnischen Brennprozesses und der Aufbereitung der Klinker zu werten. Der Unterschied beider Klinker hinsichtlich verschiedener Silikatmoduli und Alit-Gehalt zeigt in der Festigkeitsentwicklung keinen signifikanten Einfluss.

5.4. Physikalische Anforderungen

Physikalische Anforderungen nach DIN EN 197-1 sind Kriterien zu den Erstarrungszeiten, der Raumbeständigkeit und der Hydratationswärmeentwicklung. Mit Ausnahme der Raumbeständigkeit, welche bedingt durch den minimal erreichten Freikalkgehalt des Referenzklinkers (Abschnitt 4.3), außerhalb der

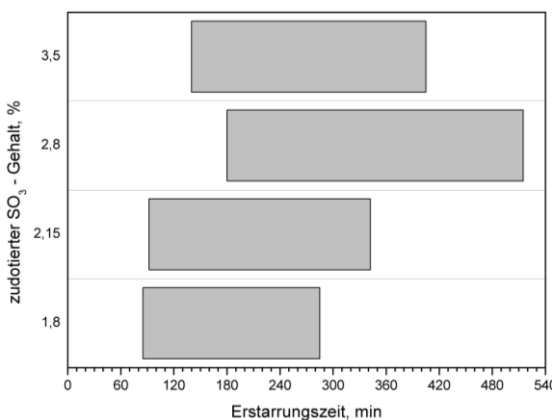


Abbildung 15: Erstarrungszeiten Zement Klinkerbasis 1.3

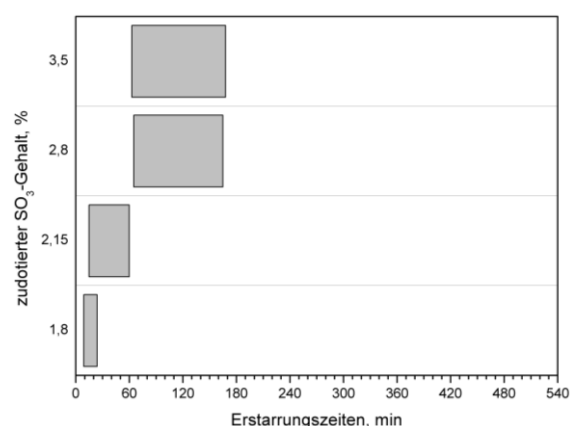


Abbildung 16: Erstarrungszeiten Zement Klinkerbasis Referenz

Grenzwerte lag, erfüllen beide Zemente die Anforderungen aus DIN EN 197-1. Der Wasseranspruch wurde am Portlandzement auf Basis des alternativen Klinkers mit 31,0 %, am Portlandzement auf Basis des Referenzklinkers mit 31,5 % bestimmt. Der Erstarrungsbeginn beider Zemente konnte mit angepassten Zugabemengen an Abbinderegler auf $t > 60$ min eingestellt werden. Die Erstarrungszeit selbst variiert zwischen beiden Zementen jedoch stark in Folge unterschiedlicher Freikalkgehalte. Dieses unterschiedliche Erstarrungsverhalten spiegelt sich am Beton bzgl. Konsistenzhaltung und Frühfestigkeit nur partiell wieder (Abschnitt 5.5). Die unterschiedliche Reaktionskinetik bestätigt sich auch in begleitenden Messungen der Hydratationswärmeentwicklung (Abbildung 17), wonach der Referenzklinker sowohl schneller reagiert, als auch mehr Gesamtwärme freisetzt. Beide Wärmetönungsraten zeigen den typischen Verlauf einer Portlandzementhydratation in ihren verschiedenen Stadien. Die deutliche höhere Gesamtwäre des Zementes auf Basis des Referenzklinkers ist dabei durch die zusätzliche Reaktionsenthalpie des Freikalkes beeinflusst.

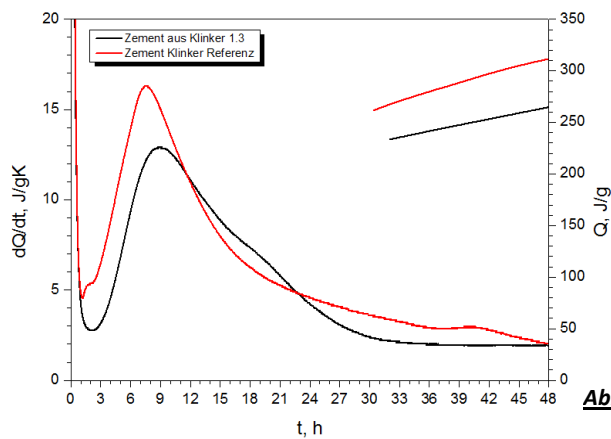


Abbildung 17: Hydratationskinetik beider Zemente

5.5. Bewertung an Laborbetonen

Die am Bindemittel und Mörtel gewonnenen Erkenntnisse wurden auf 4 Betonrezepturen übertragen, welche einen breiten Durchschnitt der Betonanwendungen abbilden. Bedingt durch die erzielte Mahlfineinheit beider Klinkermehle konnten einige Anwendungen nicht getestet werden, da sich fein aufgemahlene Portlandzemente nur bedingt dafür eignen. Ein solches Beispiel ist der Straßenbeton. Das Spektrum der Betone und die zugehörigen Eckdaten der Rezepturen sind in Tabelle 25 auf Seite 55 gegeben. Die Bewertungskriterien orientieren sich praxisnahe Anforderungen bzgl. Druckfestigkeitsentwicklung, Verarbeitbarkeit und ausgewählten Aspekten der Betondauerhaftigkeit.

5.5.1. Druckfestigkeitsentwicklung

Die Druckfestigkeit der Betone wurde im Alter von 2, 7, 28 und 56 Tagen bestimmt. Die Herstellung, Lagerung und Prüfung der Probekörper erfolgte nach ³⁵ und ³⁶. Die Ergebnisse sind in Abbildung 18 dargestellt. Alle Betone erfüllten die Mindestanforderungen der projektierten Festigkeitsklassen. An Rezeptur 1 zeigte der Zement auf Klinkerbasis 1.3 signifikante Überfestigkeiten, an Rezeptur 4 trat ein analoger Effekt am Zement mit der Referenzklinkerbasis auf. Ein Vergleich der Mahlfineinheit der jeweiligen Zementchargen zeigte Schwankungen von mehr als 700 cm²/g. Die Unterschiede in der Betondruckfestigkeitsentwicklung sind somit primär die kumulativen Faktoren aus Brennprozess und Aufbereitung. Die prinzipielle Gleichwertigkeit zeigen die Rezepturen 2 und 3.

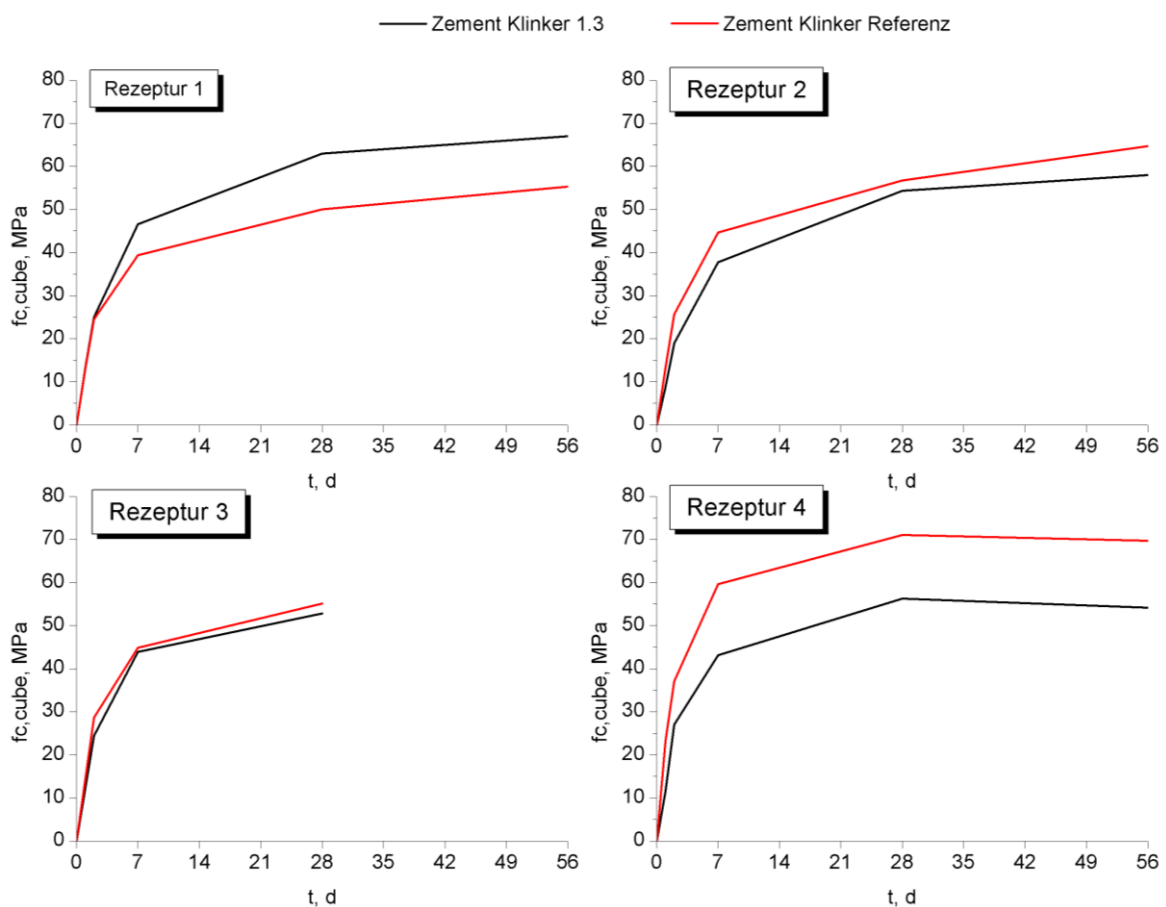


Abbildung 18: Druckfestigkeitsentwicklung der Laborbetone

³⁵ Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2009

³⁶ Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen; Deutsche Fassung EN 12390-2:2009

5.5.2. Interaktion mit Betonadditiven

Betonverflüssiger und Fließmittel

Die beiden Wirkstoffgruppen stellen die häufigsten angewandten Betonadditive dar und sind heute als Stand der Technik in nahezu allen (außer sog. erdfeuchten Betonen) Betonen wieder zu finden. Für die 4 Betonrezepturen wurde ein durchschnittlicher Betonverflüssiger (Melamin-Naphtalinsulphonat, Rezepturen 1 und 2), sowie ein Fließmittel auf PCE-Basis (20 % Feststoffgehalt, Anwendungsbereich Transportbeton, Rezeptur 3 und 4) gewählt. Unter Beibehaltung konstanter Dosiermengen (Tabelle 25) wurde die Konsistenz am Frischbeton nach ³⁷ zu verschiedenen Zeiten des Ansteifvorgangs bestimmt. Die nachstehenden Abbildungen geben die Ausgangskonsistenz und das Rücksteifverhalten der Betone wieder.

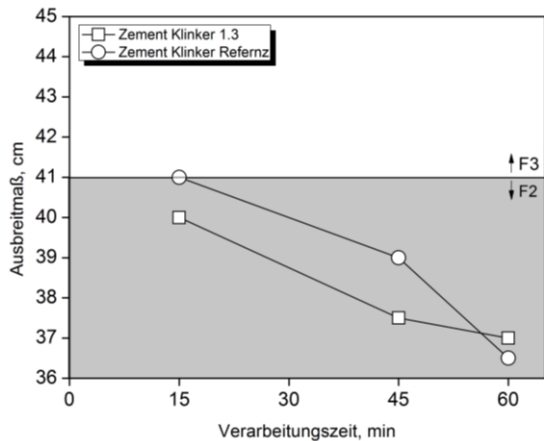


Abbildung 19: Konsistenzvergleich unter Verwendung von Betonverflüssiger am Beispiel der Rezeptur 2

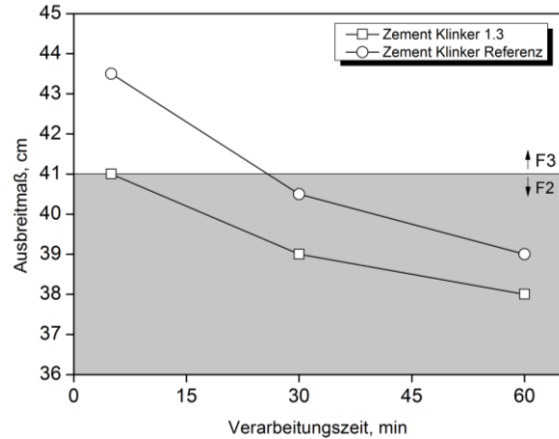


Abbildung 20: Konsistenzvergleich unter Verwendung von Fließmittel am Beispiel der Rezeptur 3

Bedingt durch die hohe Mahlfineinheit beider Zemente wurde unter Verwendung des Betonverflüssigers lediglich der Konsistenzbereich F2 erreicht. Unterschiede in der Konsistenzausbildung zwischen den beiden Zementen sind hinsichtlich erreichbarer Konsistenz und Rücksteifen nur in geringem Maße festzustellen. Unter Beibehaltung gleicher Dosiermengen wurden mit dem alternativen Klinker an beiden Wirkstoffgruppen geringfügig niedrigere Frischbetonkonsistenzen erzielt.

Luftporenbildner

Am Beispiel der Betonrezeptur 4 kann die Wirkung eines beispielhaften Luftporenbildners direkt verglichen werden. Das verwendete Additiv basiert auf modifiziertem Wurzelharz und ist breit einsetzbar im Transportbeton als auch in Betonen für den Verkehrswegebau. Bei einer konstanten Dosiermenge von 0,18 M.% v.Z. sowie einer konstanten Mischdauer von 60 ± 2 sec wurden in den Betonen folgende Frischbetonluftgehalte nach ³⁸ bestimmt:

Tabelle 16: Frischbetonluftporengehalt

Zement	A _{c,5 min} Vol. %	A _{c, 45 min} Vol. %
Zement Klinker 1.3	7,5	5,6
Zement Klinker Referenz	6,0	5,4

³⁷ Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß; Deutsche Fassung EN 12350-5:2009

³⁸ Prüfung von Frischbeton - Teil 7: Luftgehalt - Druckverfahren; Deutsche Fassung EN 12350-7:2009

Der erhöhte Luftporengehalt des alternativen Klinkers wird durch parallel durchgeführte AVA-Messungen (Air Void Analyzer) bestätigt. Dieses in der BRD nicht genormte Prüfverfahren ist detailliert in ³⁹ beschrieben und erlaubt eine Bewertung der in den Beton eingetragenen Luft hinsichtlich ihrer Porengröße und Verteilung.

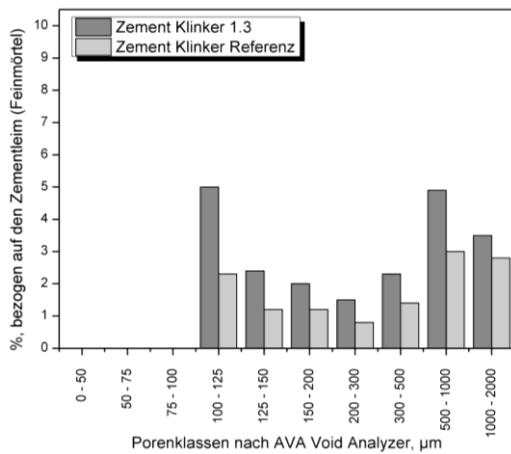


Abbildung 21: Verteilung der Luftporen im Frischbeton mittels AVA

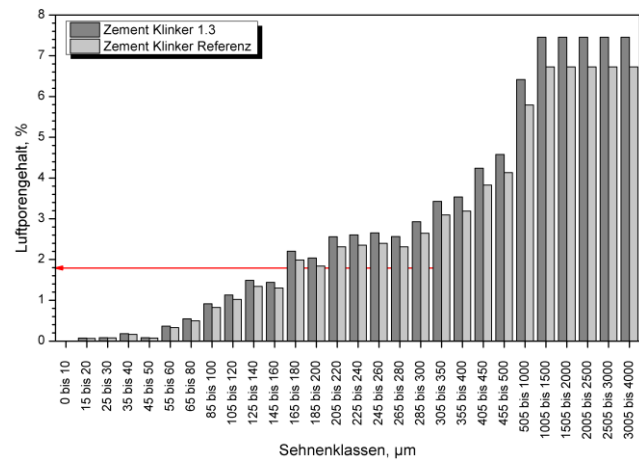


Abbildung 22: Verteilung der Luftporen im Festbeton durch Auszählung am Anschliff

Diesbezüglich in ⁴⁰ definierte Grenzwerte sichern die Unterbrechung des kapillaren Flüssigkeitstransportes, des notwendigen Expansionsraumes während der Frostzyklen und somit einen ausreichenden Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand des Betons. Beide Betone zeigen eine vergleichbare Verteilung der Luftporen sowohl im Frisch- als auch im Festbeton. Die Anforderungen an einen Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand (XF4) werden in gleichem Maße sicher erfüllt.

Tabelle 17: Mikroluftporengehalt der Festbetone

	Zement Klinkerbasis 1.3	Zement Klinkerbasis Referenz	Anforderung nach ⁴⁰
Mikroluftporengehalt A ₃₀₀ (Vol. %)	2,93	2,65	≥ 1,8
Abstandsfaktor (mm)	0,13	0,15	≤ 0,20

³⁹ Mellwitz, R. (2011): AVA - Bestimmung der Luftporengröße und -verteilung des Frischbetons am Beispiel einer Betonstraße. Betonbau.aktuell 2011. MfPA Weimar. Apolda, 10.02.2011.

⁴⁰ Merkblatt, 08-2004: Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton.

5.5.3. Frost-Tausalz widerstand als Ausblick auf die Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit von Betonen beschreibt kumulativ die auftretenden Expositionen in Abhängigkeit des Bauteils. Der hier betrachtete Portlandzement wird in nahezu allen stark exponierten Anwendungen eingesetzt. Hoch beanspruchte Bauwerke sind beispielsweise Verkehrsflächen aus Beton (Bundesautobahnen, Flugbetriebsflächen), Bauteile an Ingenieurbauwerken im Sprühnebelbereich von Tausalzen oder Bauteile in saurem Milieu. Eine der häufigsten Beanspruchung ist der Widerstand des Betons gegen eine Frost- und Frost-Tausalzbeanspruchung. Diese Beanspruchungsart wird beispielhaft als Kriterium der Betondauerhaftigkeit geprüft. Andere Kriterien, wie z.B. eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion, werden maßgeblich auch von der Gesteinskörnung des Betons beeinflusst. Zudem bietet der Alkaligehalt der gebrannten Klinker unreaale Ausgangsbedingungen.

Die Bewertung des Frost-Tausalzwiderstandes erfolgt nach dem CDF-Verfahren. Hiernach werden die Kriterien Oberflächenabwitterung und kapillare Lösungsaufnahme bewertet. Das Verfahren orientiert sich am Description-Konzept der aktuellen Betonregelwerke, wonach eine Gewährleistung der Schadensfreiheit bei Einhaltung des Grenzwertes von 1.500 g/cm² für einen Zeitraum von 30 Jahren wahrscheinlich ist. Ergänzend zum CDF-Verfahren wurde der zeitliche Verlauf der inneren Schädigung nach ⁴¹ bestimmt.

Gegenstand der Bewertung ist eine Kappenbetonrezeptur (Rezeptur 3 nach Tabelle 25) unter Verwendung der hergestellten Portlandzementklinker.

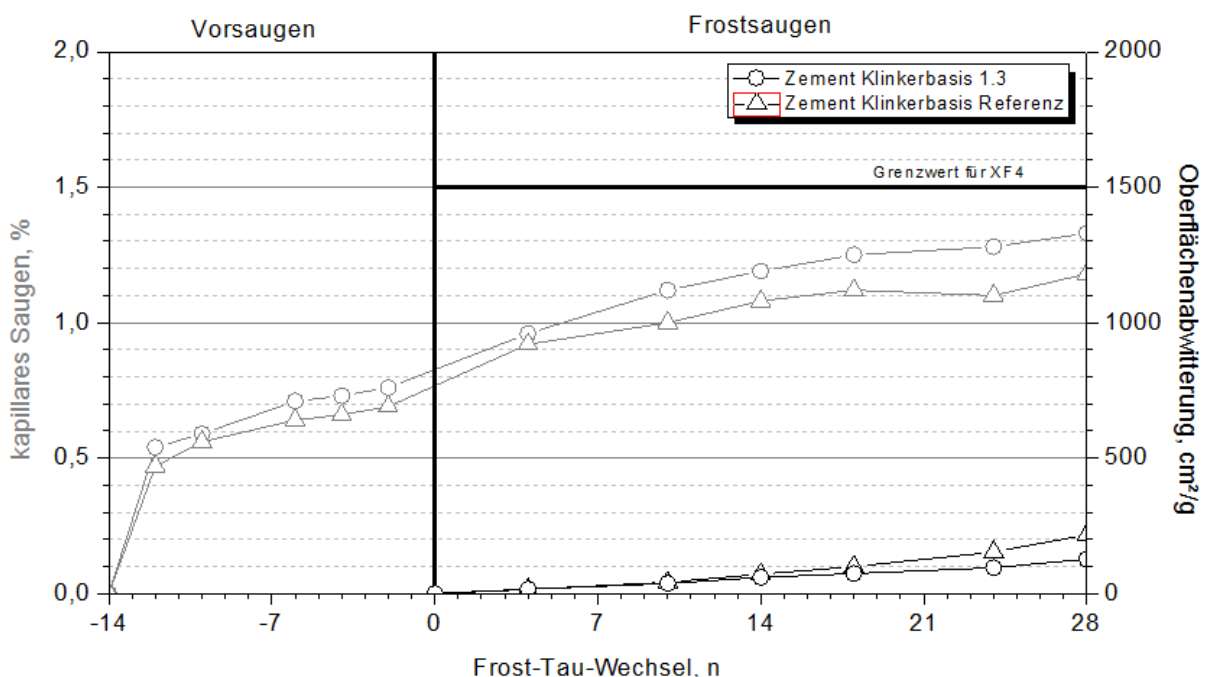


Abbildung 23: kapillares Saugen und Oberflächenabwitterung im CDF-Test

Die Abwitterung beider Betone liegt zum Bewertungszeitraum nach 28 FTW deutlich unterhalb des Abnahmekriteriums von 1.500 g/cm². Die Unterschiede zwischen den Probenserien liegen dabei im Streubereich des Prüfverfahrens, sodass beide Betone – auch hinsichtlich der kapillaren Wasseraufnahme – als gleichwertig anzusehen sind und einen hohen Widerstand gegen eine Frost-Tausalz-Beanspruchung aufweisen. Eine innere Schädigung, bestimmt als Änderung des relativen dynamischen E-Moduls nach ⁴¹, wurde an beiden Probenserien nicht festgestellt.

⁴¹ Frostprüfung von Beton, Merkblatt, 12/2004, Bundesanstalt für Wasserbau

6 Projektbegleitende ökologische Bewertung: Auswirkungen auf die CO₂-Bilanz in Abhängigkeit der Rohmehlzusammensetzung zur Klinkerproduktion

6.1. Grundlagen

6.1.1. Bilanzrahmen- und betrachtete Szenarien

Im Rahmen dieses Projektes sollen mit Hilfe einer Optimierung der herkömmlichen Rohmehlzusammensetzung eine Reduktion der CO₂-Emissionen erreicht werden. Dabei soll in Anlehnung an die Methodik der Ökobilanzierung mit Hilfe einer CO₂-Bilanz ein Beitrag zur

- projektbegleitenden Evaluierung und Entwicklung ökologisch vorteilhafter Rohmehlszenarien zur Zementklinkerproduktion, und zur
- Identifizierung von Optimierungspotentialen und Schwachstellen geleistet werden.

Umweltauswirkungen können nach DIN EN ISO 14040 und 14044 mit Hilfe von Ökobilanzen ganzheitlich, von der „Wiege bis zur Bahre“, erfasst werden.^{42,43} Im Rahmen einer Produktentwicklung, in der häufig Datenlücken auftreten und insbesondere nachfolgende Lebenswegabschnitte wie Einsatz und Entsorgung des neu zu entwickelnden Materials noch nicht feststehen, ist eine vereinfachte ökologische Bewertung in Anlehnung an die Methodik der Ökobilanzierung sinnvoll. Diese als Screening zu verstehende, vereinfachte Bilanzierung, insbesondere in Hinblick auf zu treffende Annahmen und Vernachlässigung von nachfolgenden Prozessschritten, ermöglicht in einem iterativen Vorgehen, durch fortwährende Optimierung eines oder mehrerer sich als bedenklich herausgestellter Prozessschritte zeitnah Einfluss auf das Resultat der ökologischen Bewertung zu nehmen und die ökologische Nachhaltigkeit stetig zu verbessern. Letztlich mündet ein derartiges Screening, wie im Falle der vereinfachten Ökobilanzierung beispielsweise von Fleischer et al. sowie Hochfeld und Jenseit beschrieben, im Verlauf der Entwicklung und mit zunehmender Spezifizierung und zunehmendem Informationsgehalt des Prozesses in eine vollständige Ökobilanz.^{44,45} Als Screeningmethoden finden so beispielsweise „*cradle to gate*“-Analysen, „*Streamlining*“-Techniken unter teilweiser oder vollständiger Vernachlässigung von „*upstream*“- und/oder „*downstream*“-Komponenten, oder vereinfachte Ökobilanzen, z.B. unter Anwendung von Screeningindikatoren, Einsatz.^{44,46/47} Hierbei muss jedoch in jedem Falle sichergestellt werden, dass die vorgenommene Vereinfachung nicht zu einer signifikanten Verfälschung der Ergebnisse führt. Im Rahmen der hiesigen Betrachtung wurde in Anlehnung an die Methode der Ökobilanz eine vereinfachte Bilanzierung unter Berücksichtigung eines Screeningindikators vorgenommen. Da die Emissionen hinsichtlich CO₂ eine entscheidende Größe im Rahmen einer nachhaltigen Zementproduktion darstellen, werden die CO₂-Emissionen (als Hauptemissionskomponente) als direkter Indikator für Rohstoff- und Energieeinsatz erfasst und innerhalb von Alternativszenarien verglichen. Kohlenstoffdioxid ist unter den Emissionen der Zementindustrie nahezu ausschließlich für das entstehende Treibhauspotential verantwortlich; andere Treibhausgase treten laut Monitoring-Bericht der deutschen Zementindustrie nicht oder lediglich in sehr niedrigen Konzentrationen während der Zementherstellung auf.⁴⁸ Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Resultate beziehen sich dabei auf fossiles Kohlendioxid.

⁴² ISO 14040: 2006, Environmental management - Life cycle assessment – Principles and framework. Brussels, Belgium, European Committee for Standardization, 2006

⁴³ ISO 14044: 2006, Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. Brussels, Belgium, European Committee for Standardization, 2006

⁴⁴ G. Fleischer, W. P. Schmidt. Iterative screening LCA in an eco-design tool. International Journal of Life Cycle Assessment 2, 20-24, 1997

⁴⁵ C. Hochfeld, W. Jenseit. Allokation in Ökobilanzen und bei der Berechnung des Kumulierten Energieaufwandes (KEA), Erarbeitung von Basisdaten zum Energieaufwand

⁴⁶ R. G. Hunt, T. K. Boguski, K. Weitz, A. Sharma. Case studies examining LCA Streamlining Techniques. International Journal of Life Cycle Assessment 3, 36-42, 1998

⁴⁷ Final Report of the SETAC-Europe Screening and Streamlining Working-Group, Society of Environmental Chemistry and Toxicology SETAC. Simplifying LCA: just a cut? Brussels, Belgium, 1997

⁴⁸ Verminderung der CO₂-Emissionen – Erklärungen zur Klimavorsorge, Monitoring-Berichte der deutschen Zementindustrie, 2008-2009, Verein Deutscher Zementwerke e.V., Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, 2010

Der Bilanzrahmen der zu betrachtenden ökologischen Bewertung befindet sich in Abbildung 24. Die ökologischen Betrachtungen fokussieren auf den Prozess der Zementklinkerproduktion und die damit verbundenen „upstream“-Prozesse. Als funktionelle Einheit, auf die sich die CO₂-Bilanz für alle Szenarien bezieht, wurde die Produktion von einer Tonne Zementklinker definiert. Nachfolgende Prozessschritte zur Zement- und Betonproduktion werden nicht berücksichtigt; d.h. innerhalb der Alternativszenarien wird von einer vergleichbaren Verarbeitung, Verwendung und Funktionalität bzw. Leistungsfähigkeit der Zementklinker bzw. des entstehenden Zementes ausgegangen. Nur unter dieser Annahme ist eine Gegenüberstellung der alternativen Szenarien innerhalb dieses Bilanzrahmens tragbar.

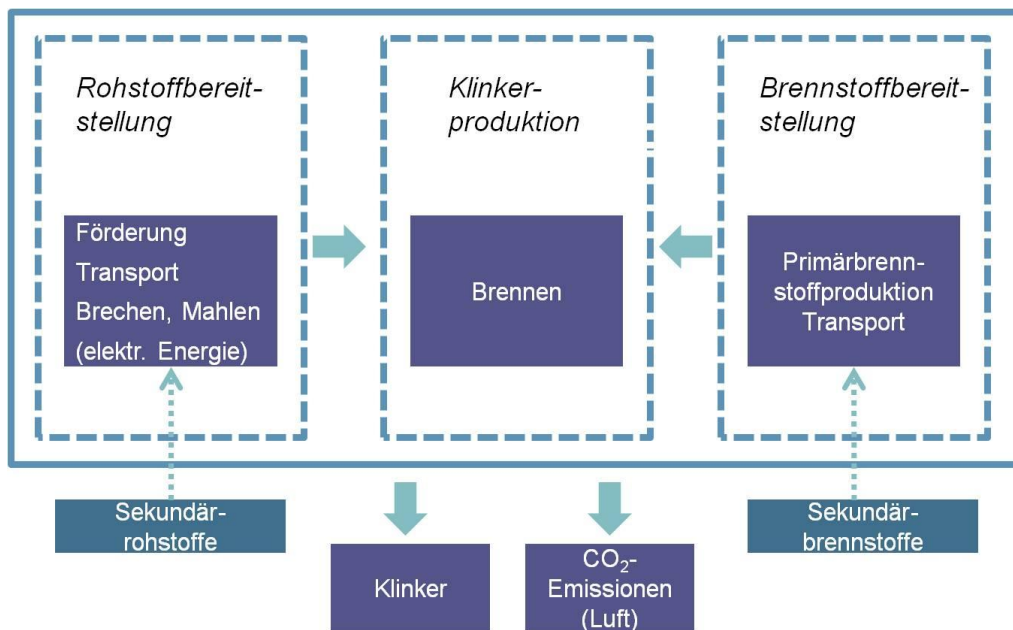


Abbildung 24: Bilanzrahmen der zu betrachtenden CO₂-Bilanz innerhalb der Zementklinkerproduktion

Die betrachtete Prozesskette umfasst die Gewinnung der Primärrohstoffe als Ausgangsstoffe zur Zementklinkerproduktion, damit verbundene Transportprozesse sowie die Verarbeitung der Rohmehlkomponenten (elektrischer Energiebedarf zum Brechen von Kalkstein, Vermahlen aller Rohmehlkomponenten) und anschließenden thermischen Behandlung. Im Falle der thermischen Behandlung, des Brennprozesses, sind Bereitstellung und nötige Transporte von Primärbrennstoffen berücksichtigt.

6.1.2. Zuordnung der CO₂-Emissionen

Neben den prozessbedingten CO₂-Emissionen aus bspw. vorgelagerten Prozessen und elektrischem Energiebedarf werden thermisch bedingte, i.e. rohstoff- bzw. brennstoffbedingte Kohlendioxidemissionen als Output erfasst; diese setzen sich aus der Kalksteinentsäuerung während des Brennprozesses sowie dem Einsatz von Brennstoffen zusammen. Rohstoffbedingte CO₂-Emissionen resultierend aus der Kalksteinentsäuerung sind nicht Gegenstand der Selbstverpflichtung der Zementindustrie, sollen im Bilanzrahmen aber dennoch ihre Berücksichtigung finden, und werden zudem auch im Rahmen des Monitorings der deutschen Zementindustrie erfasst.⁴⁸

Fossile Brennstoffe werden teilweise durch Sekundärbrennstoffe, beispielsweise Altreifen, Altöl, Tiermehl etc. ersetzt. Der Einsatz abfallstämmiger Sekundär(brenn-)stoffe und damit die Substitution von Primärstoffen bzw. fossilen Brennstoffen tragen maßgeblich zur Schonung von Rohstoffen bei. Ferner müssen diese Stoffe nicht an anderer Stelle deponiert oder verbrannt werden, so dass keine zusätzlichen Umweltlasten entstehen. In der weiterentwickelten Selbstverpflichtung der Zementindustrie wird der Einsatz von Sekundärbrennstoffen als CO₂-frei gerechnet bzw. die entstehenden CO₂-Emissionen als neutral gewertet.⁴⁸ Demgegenüber schließt der

Emissionshandel, im Gegensatz zur Systematik der Selbstverpflichtung, die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung abfallstämmiger Sekundärbrennstoffe, soweit nicht biogener Natur, ein.⁴⁸

Auch andere Quellen zeugen von der Vernachlässigung der Sekundär(brenn-)stoffe im Bilanzrahmen der Zementproduktion.⁴⁹ Eyerer und Reinhardt⁵⁰ sowie Kreißig et al.⁵¹ beschreiben die Möglichkeiten zur Verteilung von Aufwendungen und Einsparungen während des Wiedereinsatzes von Baustoffen nach einer Nutzungsphase. Auch Schaltegger behandelt Allokationsmodelle für verschiedene Prozesstypen, so beispielsweise dem „Open-Loop-Recycling“, welches einen Wiedereinsatz von Stoffen bei der Herstellung anderer Produkte bezeichnet.^{50,52} Für Abfälle mit einem negativen Marktwert, die im Folgenden einer stofflichen und energetischen Verwertung in einem stoffaufnehmenden Lebenszyklus zukommen, kann demnach folgende Verteilungsmöglichkeit im Rahmen der Sachbilanzierung angewandt werden: Aufwendungen für etwaige Aufbereitungen der Abfälle trägt der stoffaufnehmende Lebenszyklus, während eine Verteilung/Allokation der Primärwerkstoffherstellung nicht stattfindet.

Dieses Modell wurde auf die Problematik der Abfallberücksichtigung im Rahmen des hier betrachteten Bilanzrahmens übertragen, wobei davon ausgegangen wird, dass notwendige Transportprozesse zum Werk sowie Aufwendungen für die Abfallaufbereitung Berücksichtigung finden sollen, während auf die Betrachtung der Sekundär(brenn-)stoffe hinsichtlich Vorkette verzichtet wird. Ähnliches findet sich auch bei Kawai et al.⁵³

6.1.3. Datenverfügbarkeit

Im Falle der Sekundärrohstoffe ist eine ausreichende Datengrundlage hinsichtlich Herkunft der Materialien verfügbar, so dass Transportprozesse entsprechend in die Sachbilanz integriert wurden. Ebenso wurden thermisch bedingte Emissionen durch Sekundärrohstoffe der Vollständigkeit halber im Rahmen der Auswertung betrachtet, um deren Einfluss auf die CO₂-Bilanz zu bewerten, während im Falle der Sekundärbrennstoffe keine detaillierte Datengrundlage zu Herkunft, Art und Menge der Stoffe vorlag und somit auf eine nähere Betrachtung hinsichtlich Transportprozesse und Emissionen verzichtet werden musste. Aufwendungen für zusätzliche Aufreinigungsschritte für den Einsatz der Abfallstoffe bestehen laut Projektpartner nicht. Weiterhin erfolgte für alle Szenarien auf Grund fehlender Daten keine Berücksichtigung von Kühl- sowie Abgasreinigungsprozessen, und es entfällt ein zusätzlicher Energiebedarf zum Trocknen, da die Abluft des Ofens für die Trocknung der Ausgangsmaterialien genutzt wird. Inwiefern Abluft bzw. Abwärme anderweitig genutzt oder verwertet werden, ist nicht bekannt. Eine Abfallbehandlung blieb ebenso unberücksichtigt, da Reststoffe, in dem Fall anfallender Bypassstaub, bei der Zementmahlung als Nebenbestandteil wieder zugesetzt werden und die Bilanz eher begünstigen sollten.⁵⁴ Hierzu lagen jedoch keine näheren Daten vor. Auf die Berücksichtigung der Peripherie, so z.B. in Form von verwendeten Geräten, Anlagen und Gebäuden wurde ebenso verzichtet, da im Rahmen des hier vorliegenden Screenings davon ausgegangen wird, dass die Rohmehle/Rohmehlkomponenten unabhängig vom Szenario technisch gleich behandelt werden.

Im Vorfeld erfolgte eine Datenerhebung zur Erstellung einer Sachbilanz der Stoff- und Energieströme. Grundlage der ökologischen Bewertung bildeten die in Tabelle 18 dargestellten Szenarien und deren Zusammensetzung. Die Rohmehlzusammensetzungen wurden, wie eingangs ausführlich beschrieben, hinsichtlich der Kriterien: Variation des Silikatmoduls, Variation des Gehaltes an Porenbetonmehl, Berücksichtigung von LD-Schlacke und Variation der Braunkohleasche definiert. Das Referenzszenario, welches die herkömmliche Zementproduktion in einem deutschen Zementwerk beschreibt, wird hierbei als „Referenz“

⁴⁹ C. Chen, G. Habert, Y. Bouzidi, A. Jullien. Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation. *Journal of Cleaner Production* 18, 478-485, 2010

⁵⁰ P. Eyerer, H.-W. Reinhardt. *Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden. Wege zu einer ganzheitlichen Bilanzierung.* Bau Praxis Birkhäuser, 2000

⁵¹ J. Kreißig, M. Baitz, M. Betz, P. Eyerer, J. Kummel, H.-W. Reinhardt. *Leitfaden zur Erstellung von Sachbilanzen in Betrieben der Steine-Erden-Industrie*, 1997

⁵² *Life Cycle Assessment (LCA) – Quo Vadis?*, S. Schaltegger, Birkhäuser Verlag, 1996

⁵³ K. Kawai, T. Sugiyama, K. Kobayashi, S. Sano. Inventory Data and Case Studies for Environmental Performance Evaluation of Concrete Structure Construction. *Journal of Advanced Concrete Technology* 3, 435-456, 2005

⁵⁴ Angaben eines deutschen Zementwerkes (Referenzszenario), Februar 2010

bezeichnet und dient der Orientierung hinsichtlich etwaiger CO₂-Einsparungen und Einsparungspotentiale bei der Anwendung von Alternativszenarien.

Tabelle 18: Übersicht der betrachteten Szenarien

	Kalkstein	Sand 1	Sand 2	Eisenkomp.	BFA	PBM	LD-Schlacke
	[M- %]	[M- %]	[M- %]	[M- %]	[M- %]	[M- %]	[M- %]
Referenz ⁵⁴	89,10	6,10	4,30	0,40			
1.1	75,25		3,43		16,29	5,00	
1.2	77,17		4,08		13,75	5,00	
1.3	78,80		4,65		11,55	5,00	
1.3 korrr*	79,50		3,35		12,14	5,00	
1.4	80,23		5,14		9,62	5,00	
2.1	78,80		4,65		11,55	5,00	
2.2	76,50		2,00		11,50	10,00	
2.3	74,77				11,46	13,77	
3.1	79,10		4,91		9,99	5,00	1,00
3.2	79,68		5,43		6,89	5,00	3,00
3.3	80,27		5,96		3,78	5,00	5,00
4.1	78,80		4,65		11,55	5,00	
4.2	79,46		2,83		12,71**	5,00	

*Im späteren Verlauf der Arbeiten und Planung der Versuche im großen Drehrohren wurde die Rohmehlzusammensetzung des Szenario 1.3 entsprechend korrigiert. Darauf wird im Text gesondert hingewiesen.

**Herkunft der Braunkohleflugasche von den übrigen Szenarien abweichend

Weitere Sachbilanzdaten, so die Herkunft der Materialien, Einsatzfaktoren oder Energiebedarf finden sich im anschließenden Abschnitt 6.1.4.

6.1.4. Verwendete Software und Datengrundlage

Die Bilanzierung erfolgte unter Anwendung des Programmes UMBERTO 5.5⁵⁵ zur Erstellung von Stoff- und Energiestromnetzen. Mit Hilfe der integrierten Datenbank Ecoinvent v2.2⁵⁶ wurden entsprechende Inventardaten hinsichtlich der Bereitstellung der Rohstoffe, Materialien, Energie oder Transportprozesse integriert. Die Emissionsfaktoren aller Materialien und Rohstoffe, Energieträger sowie Transportprozesse beruhen auf dem Ecoinvent-Datenbestand v2.2.

Neben den Rohmehlzusammensetzungen in Tabelle 1 bildeten die in Tabellen 2 und 3 angegebenen, von den Partnern gelieferten Daten die Grundlage der Bewertung. In Tabelle 2 sind zu berücksichtigende Transporte der Materialien verzeichnet; die Bereitstellung der Materialien des Rohmehles, aber auch die Bereitstellung von Energieträgern, ist mit zusätzlichen Transportprozessen verbunden. Im Falle von Kalkstein und Eigensand wurde davon ausgegangen, dass deren Fördergebiete/Steinbrüche nahe am Zementwerk gelegen sind, und die Bereitstellungen daher keiner zusätzlichen Transporte bedürfen. Sofern Transportprozesse benötigt werden, erfolgen diese laut Projektpartner generell über Straße.

Ferner sind die für die jeweiligen Materialien, Energien und Transporte verwendeten Module aus Ecoinvent 2.2 verzeichnet. Sofern möglich, wurde auf Datensätze, die die Situation in Deutschland (DE) bzw. Europa (RER) widerspiegeln, zurückgegriffen. Im Falle von Kalkstein wurde bspw. auf für die Schweiz gültige Inventardaten zur Bereitstellung zurückgegriffen.

⁵⁵ Umberto v5.5, 2007. ifu Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH; ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH; Deutschland

⁵⁶ Ecoinvent database by Frischknecht et al., v2.2, 2010, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Schweiz

Tabelle 19: Zu berücksichtigende Module: Herkunft und Dateninventar in Ecoinvent 2.2

	Zu berücksichtigende Transportstrecke ¹⁶	Dateninventar zur Bereitstellung [Ecoinvent 2.2]
Rohmaterialien, Brennstoff, Strom		
Kalkstein	- (Zementwerk)	Kalkstein, ab Abbau [CH]
Braunkohleflugasche	ca. 150 km	
Eigensand	- (Zementwerk)	Quarzsand, ab Werk [DE]
Fremdsand	mittlere Entfernung mehrerer Standorte: ca. 100 km	Quarzsand, ab Werk [DE]
Porenbetonmehl	ca. 200 km	
LD-Schlacke	ca. 300 km	
Eisenkomponente (Walzzunder)	ca. 150 km	
Braunkohlestaub	ca. 150 km	Braunkohlestaub, ab Werk [DE]
Wasser		Wasser, vollentsalzt, ab Werk [RER]
Strom		Strommix [DE]
Transporte Straße		Transport, LKW > 16t, Flottendurchschnitt [RER]

Der Materialien- und Energiebedarf ist entsprechend den Rohmehlzusammensetzungen in Tabelle 18 bzw. nachfolgend Tabelle 20 zu entnehmen. Hinsichtlich des Wasserbedarfes wurde auf durchschnittliche Verbrauchswerte der Zementindustrie zurückgegriffen.⁵⁷

In Tabelle 20 finden sich die verwendeten Einsatzfaktoren, welche als die benötigte Menge an Rohmehl (bezogen auf trockenes Material) pro Tonne Klinker definiert sind und sich aus dem Glühverlust berechnen lassen.⁵⁸ Tabelle 20 enthält ferner Angaben zum Energiebedarf, der zum Brechen des Kalksteins⁵⁴, Mahlen aller für das Rohmehl zu betrachtenden Komponenten⁵⁴ sowie zum Klinkerbrennen zu berücksichtigen ist.

Im Falle des Mahlprozesses aller Komponenten ist zum momentanen Zeitpunkt eine Differenzierung des benötigten elektrischen Energiebedarfes lediglich auf Grund der Menge der Bestandteile sowie dem Einsatzfaktor möglich; eine Differenzierung in Abhängigkeit der Rohmehlzusammensetzung, die unter Umständen zu einer vereinfachten oder erschwerten Mahlung führen kann, ist nicht möglich; daher wurden für alle Szenarien der herkömmlich im Werk benötigte Energiebedarf angenommen.

Hinsichtlich des Energiebedarfes zum Brennen konnte lediglich ein für das Referenzszenario praktisch erhaltener Wert von 3,74 GJ/t Klinker zu Grunde gelegt werden.⁵⁴ Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den Alternativszenarien erfolgte in Anlehnung an die Methode nach ZUR STRASSEN⁵⁹ und unter Berücksichtigung eines Wirkungsgrades von 50 % eine Abschätzung des theoretischen Wärmeaufwandes zum Klinkerbrennen. Hierbei beträgt der resultierende Wärmeaufwand für das Referenzszenario 800 kcal/kg Klinker, im Falle der Alternativszenarien, für die auf Grund der Komplexität keine Differenzierung vorgenommen wurde, 700 kcal/kg Klinker.⁶⁰

Hinsichtlich der Bereitstellung der Brennstoffe ist festzuhalten, dass lediglich 50 % des angegebenen Energiebedarfes zum Klinkerbrennen über fossile Energieträger, in dem Fall Braunkohlestaub bereitgestellt werden müssen, während ca. 50 % des Energiebedarfes über Sekundärbrennstoffe abgedeckt werden.⁶¹

⁵⁷ Durchschnittswerte zementproduzierender Werke, Verbund- bzw. Direktvertrieb: 0,04 kg Wasser/kg Klinker bzw. 0,2 kg Wasser/kg Klinker, Werte erhalten von IBU-tec, Dipl.-Ing. S. Vogel, März 2011

⁵⁸ Vollanalyse der Rohstoffe, IBU-tec, Dr. J. Kieser, März 2010

⁵⁹ H. zur Strassen. Der theoretische Wärmebedarf des Zementbrandes. Zement - Kalk - Gips 10, 1 – 12, 1975

⁶⁰ Mündliche Information, IBU-tec, Dr. J. Kieser, März 2010

⁶¹ Schriftliche Information, IBU-tec, Dipl.-Ing. S. Vogel, März 2011

Tabelle 20: Verwendete Einsatzfaktoren und spezifischer elektrischer Energieverbrauch in Abhängigkeit der Szenarien

	<i>Einsatz- faktor</i> [kg/kg Klinker]	<i>Energiebedarf Brechen</i> [kWh/t Rohmaterial]	<i>Energiebedarf Mahlen</i> [kWh/t Rohmaterial]	<i>Energiebedarf Brennen</i> [kcal/kg Klinker]
Referenz	1,53	0,5	14	800
1.1	1,42	0,5	14	700
1.2	1,44	0,5	14	700
1.3	1,45	0,5	14	700
1.4	1,46	0,5	14	700
2.1	1,45	0,5	14	700
2.2	1,44	0,5	14	700
2.3	1,44	0,5	14	700
3.1	1,46	0,5	14	700
3.2	1,46	0,5	14	700
3.3	1,47	0,5	14	700
4.1	1,45	0,5	14	700
4.2	1,46	0,5	14	700

Die thermisch bedingten Emissionen setzen sich aus den während des Brennprozesses freiwerdenden CO₂-Emissionen zusammen. Einerseits werden diese rohstoffbedingt durch die Entsäuerung des Kalksteins oder anderer CO₂-haltigen Komponenten, andererseits brennstoffbedingt durch die Verbrennung von Energieträgern erzeugt. Die Bestimmung der rohstoffbedingten Emissionen erfolgte aus den CO₂-Analysenwerten der Rohmehlkomponenten⁵⁸, während die brennstoffbedingten Emissionen hinsichtlich des fossilen Energieträgers Braunkohle mit Hilfe des Emissionsfaktors für Braunkohlestaub (Mitteldeutschland) nach der bundeseinheitlichen Liste der CO₂-Emissionsfaktoren berechnet wurden.⁶² Praktisch konnte eine brennstoffbedingte CO₂-Emission von 310 kg CO₂/t Klinker ermittelt werden; dieser Wert umfasst allerdings sowohl die thermische Verwertung von Primär- als auch von Sekundärbrennstoffen und wurde daher lediglich zur Orientierung verwendet.⁵⁴

6.2. Resultate

6.2.1. Screening über alle Rohmehle

Zu Beginn erfolgte ein Screening über alle Rohmehlalternativen, in welchem im Vergleich zum Referenzszenario Optimierungspotentiale bzw. wesentliche, auf die CO₂-Bilanz einflussnehmende Größen identifiziert werden konnten. Nachfolgend werden die erzielten Resultate in graphischer Form dargestellt (Abbildung 25). Dabei bedeutet das in der Legende beschriebene Modul „Bereitstellung Ausgangsstoffe“ die Gewinnung und den Transport der Primärrohstoffe sowie den Transport der Sekundärrohstoffe. Die thermisch bedingten Emissionen sind der Übersicht halber in die Module „brennstoffbedingte Emissionen“, d.h. Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe, sowie „Entsäuerung“, d.h. Emissionen aus der thermischen Behandlung der Rohmehlkomponenten, unterteilt. Die aus dem elektrischen Energieverbrauch sowie der Bereitstellung fossiler Energieträger (für den Brennprozess) resultierenden CO₂-Emissionen sind separat aufgeführt.

⁶² Bundeseinheitliche Liste der CO₂-Emissionsfaktoren (bezogen auf den unteren Heizwert), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2003

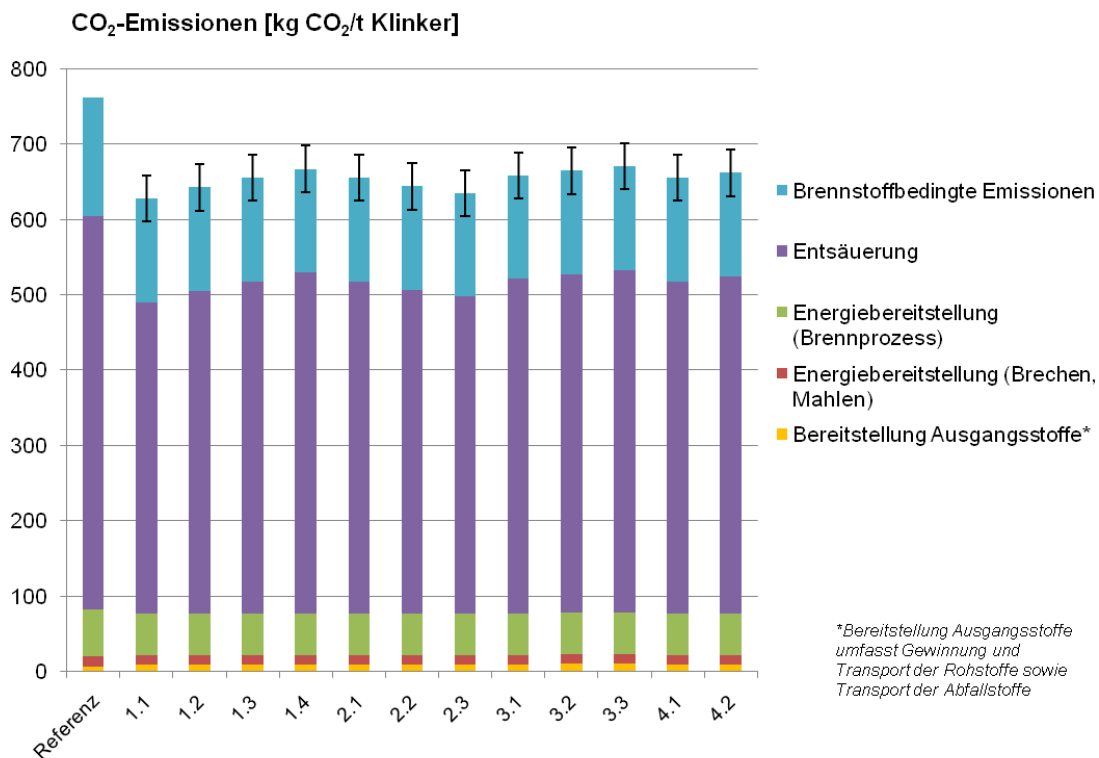


Abbildung 25: Graphische Darstellung der CO₂-Emissionen in Abhängigkeit der Szenarien

Es ist ersichtlich, dass im Vergleich zur Referenz reduzierte CO₂-Emissionswerte zu erreichen sind; diese bewegen sich in Abhängigkeit vom Szenario ca. 12 % - 18 % unterhalb des Referenzwertes und werden dominierend vom Kalksteinanteil geprägt. So schneiden Szenarien mit einem hohen Kalksteinanteil, beispielsweise Szenarien 1.4 und 3.3, auf Grund der thermischen Behandlung und Entsäuerung des Carbonates entsprechend schlechter ab. Die direkten Emissionen während des Brennvorganges haben wesentlichen Einfluss auf die Gesamtbilanz; die Emissionen durch Entsäuerung und Brennstoffverwertung tragen durchschnittlich zu etwa 67 % bzw. 21 % zum Gesamtwert bei, während die Bereitstellung der Braunkohle sowie die übrigen Module einen Beitrag von ca. 8 % und kleiner leisten. Durch anteiligen Ersatz des Kalksteins und dadurch einer Reduzierung des CO₂-Gehaltes im Rohmehl kann eine rohstoffbedingte Optimierung von bis zu 21 % erwartet werden, wodurch innerhalb der CO₂-Bilanz Einsparungen von ca. 14 % erzielt werden können (Szenario 1.1).

Hinsichtlich der brennstoffbedingten Emissionen ist grundsätzlich ein hohes Optimierungspotential durch Ersatz fossiler Brennstoffe durch Abfallstoffe zu erwarten; dies wurde hier nicht näher untersucht, da bereits von einer 50 %igen, energiebezogenen Substitution ausgegangen werden konnte. Im Falle eines alleinigen Einsatzes fossiler Rohstoffe wären um den Faktor 2 höhere brennstoffbedingte CO₂-Emissionen anzunehmen. Ferner kann durch die im Falle der Alternativszenarien angenommene Reduktion des Energiebedarfes zum Brennen im Vergleich zum Referenzszenario eine Reduktion der brennstoffbedingten CO₂-Emissionen (Brennstoffverwertung) um ca. 13 % erwartet werden, die mit einer Reduktion von kleiner 3 % zur CO₂-Bilanz beitragen. Auf Grund des vergleichsweise geringen Einflusses auf die CO₂-Bilanz ist die vorgenommene Abschätzung des theoretischen Wärmebedarfes und fehlende Differenzierung innerhalb der Alternativszenarien zulässig. Berücksichtigt man ferner eine Sensitivitätsanalyse, wird ersichtlich, dass der Einfluss der getroffenen Annahmen im Rahmen der Datenerhebung hinsichtlich des Brennstoffbedarfes als marginal zu werten ist und den Trend nicht verändert. Der Einfluss einer Variation des theoretischen Wärmeverbrauches um +100 kcal/kg Klinker („Worst-case“, da keine Änderung zum Referenzszenario) bzw. -100 kcal/kg Klinker (Annahme eines „Best-case“) auf die CO₂-Bilanz liegt bei durchschnittlich ca. 4 % (bezogen auf Brennstoffbereitstellung und -verwertung). Zusätzlich wurde eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich des

elektrischen Energieverbrauches zur Rohmaterialverarbeitung durchgeführt, da auch hier keine szenarienspezifischen Daten zur Verfügung standen. Dabei zeigte sich ein ebenso vernachlässigbar geringer Einfluss auf die CO₂-Bilanz (< 1 %).^{*} Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind in Abbildung 25 im Rahmen von Fehlerindikatoren dargestellt.

Dieses Screening zeigte verschiedene Möglichkeiten zur Reduktion der CO₂-Emissionen auf. Wie in Kapitel 4.2 erläutert, wurde schließlich auf Grund diverser Kriterien (technische Grenze Silikatmodul, Schwermetallgehalt LD-Schlacke, geringe Anfallmengen PBM in reiner Form, reduzierter Kalksteingehalt) Szenario 1.3 unter geringfügiger Veränderung der Rohmehlzusammensetzung für weitere Untersuchungen (Großbrennversuche und Charakterisierung) favorisiert. Im Folgenden werden die für das präferierte Szenario 1.3 unter korrigierter Rohmehlzusammensetzung, siehe Tabelle 18, erhaltenen Resultate zur CO₂-Bilanz detailliert vorgestellt und mit dem Referenzszenario verglichen.

6.2.2. Prozessbedingte CO₂-Emissionen

Die nachfolgende Abbildung stellt die Ergebnisse im Falle des für die Großbrennversuche favorisierten Szenario 1.3 im Vergleich zur Referenz hinsichtlich der CO₂-Emissionen dar, die aus der Rohstoffbereitstellung resultieren. Dabei sind, wie erwähnt, Abfallstoffe (Braunkohleflugasche, Porenbetonmehl, Walzzunder) nur hinsichtlich notwendiger Transportprozesse integriert, während „upstream“-Prozesse zu deren Bereitstellung unberücksichtigt blieben. Die Bereitstellung von Primärrohstoffen wurde sowohl hinsichtlich „upstream“-Prozessen zur Gewinnung, als auch notwendiger Transporte, in die Bilanz integriert. Angaben zum Wasserbedarf wurden durchschnittlichen Verbrauchswerten der Zementindustrie entnommen.⁵⁷ Dabei kann gezeigt werden, dass der Einsatz von Prozesswasser selbst unter Annahme eines Direktbetriebes (in einem erhöhten Wasserbedarf resultierend) eine vernachlässigbar geringe Komponente innerhalb der CO₂-Bilanz darstellt.

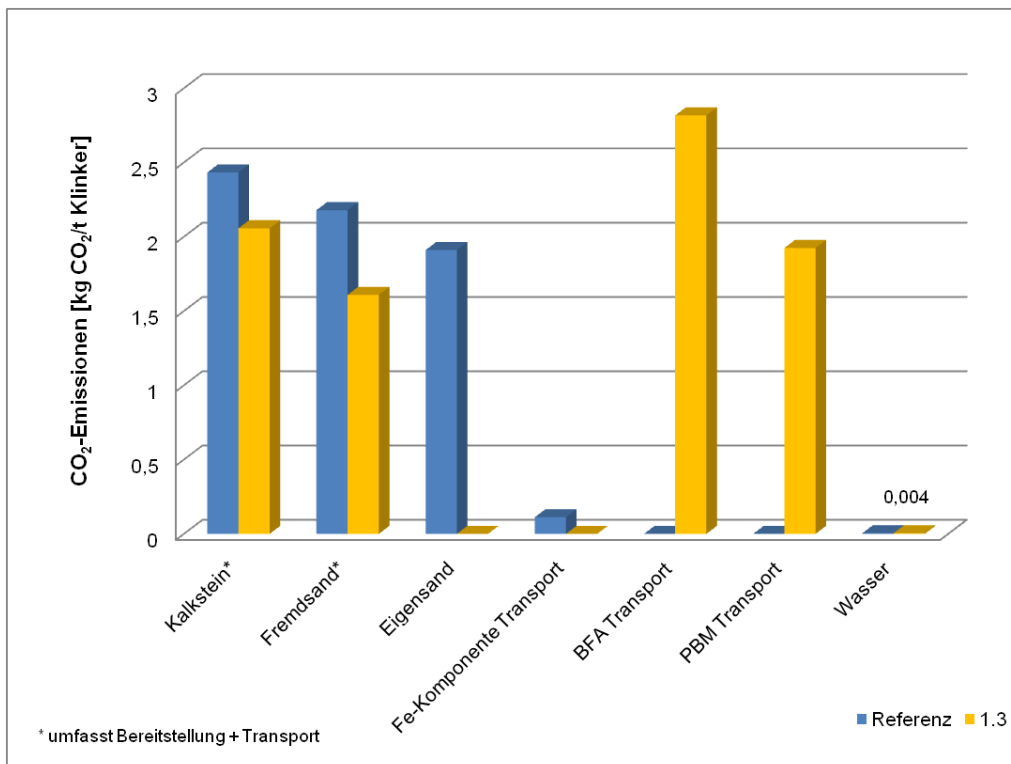


Abbildung 26: Graphische Darstellung der CO₂-Emissionen innerhalb des Referenzszenarios und Szenario 1.3, resultierend aus der Materialbereitstellung; Eisenkomponente: Walzzunder, BFA: Braunkohleflugasche, PBM: Porenbetonmehl

^{*} Die Sensitivitätsanalyse berücksichtigt eine Variation des elektrischen Strombedarfes um +/- 25 % sowie eine Differenzierung des theoretischen Wärmebedarfes der Alternativszenarien um +/- 100 kcal/kg Klinker im Falle der Alternativszenarien.

Der Vergleich beider Szenarien zeigt, dass vorerst ein Mehraufwand im Falle des Alternativszenarios, speziell hinsichtlich zusätzlicher Transportprozesse zur Abfallbereitstellung, zu verzeichnen ist, der in einer erhöhten CO₂-Emission resultiert. Berücksichtigt man jedoch nachfolgende Prozessschritte, wie in den nächsten Abschnitten demonstriert, sind der Anteil der Bereitstellung und Verarbeitung der Ausgangsmaterialien und damit der Einfluss von Transportprozessen zur Bereitstellung an der Gesamtbilanz als marginal zu werten.

In Abbildung 27 sind die CO₂-Emissionswerte resultierend aus Materialbereitstellung sowie Verarbeitung zusammenfassend dargestellt. Auf Grund des höheren Einsatzfaktors im Fall des Referenzszenarios, welcher eine größere Einsatzmenge der Materialien und damit verbunden einen erhöhten Verarbeitungsaufwand unter zusätzlichem elektrischen Energiebedarf vorgibt, sind im Falle der Verarbeitung der Rohmehlkomponenten im Vergleich zu den Alternativszenarien höhere CO₂-Werte zu erwarten. Dies gilt unter der Voraussetzung, dass keine Änderung des spezifischen elektrischen Stromverbrauches in Abhängigkeit der Rohmehlzusammensetzung auftritt. Unter Berücksichtigung einer Variation dessen um +/- 25 % ergibt sich eine entsprechende Abweichung der durch Stromverbrauch resultierenden CO₂-Emissionen (siehe Abbildung 27).

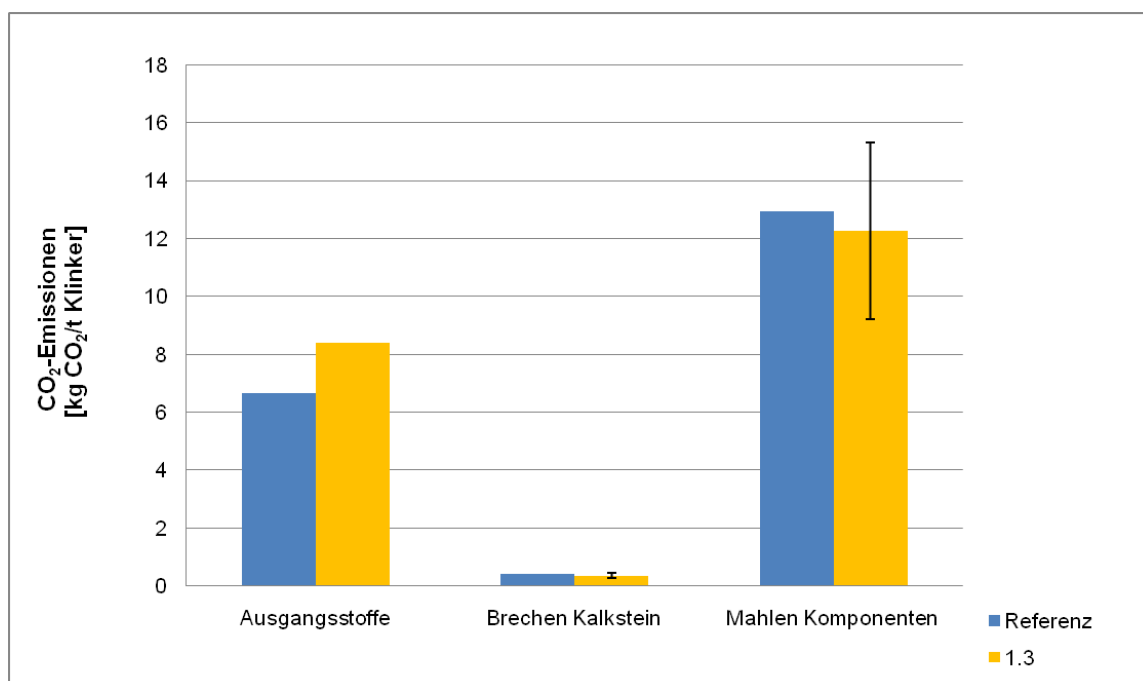


Abbildung 27: Graphische Darstellung der CO₂-Emissionen innerhalb des Referenzszenarios und Szenario 1.3, resultierend aus der Materialbereitstellung und Verarbeitung der Komponenten (Brechen, Mahlen)

Die Datengrundlage hinsichtlich des elektrischen Energiebedarfes und damit die Bewertung prozessbedingter Emissionen infolge des elektrischen Energiebedarfes ist momentan nicht ausreichend, um weitere Aussagen treffen zu können. So fehlen Angaben hinsichtlich der Kühlprozesse, Abgasreinigung etc. Die Projektpartner gehen jedoch davon aus, dass sich eine veränderte Rohmehlzusammensetzung auf die den Ofen vor-, aber auch nachgelagerten Anlagenteile auswirkt. So ist beispielsweise auf Grund eines geringeren CO₂-Ausstosses eine Verringerung des Energiebedarfes während der Abgasreinigung zu erwarten. Diese Verringerung kann zum derzeitigen Entwicklungsstand jedoch noch nicht quantifiziert werden.

Den größten Einfluss auf die resultierende CO₂-Bilanz haben allerdings die Emissionen, die aus der Entsäuerung des Rohmehles stammen und im nachfolgenden Abschnitt vorgestellt werden.

6.2.3. Thermisch bedingte Emissionen: Rohstoffe

Wie bereits erwähnt, tragen die aus der thermischen Behandlung der Rohstoffe resultierenden CO₂-Emissionen zu ca. 67 % zur Gesamtemission bei. Im Falle des Szenario 1.3 beträgt der Anteil ca. 68 %. Sekundärstoffe bleiben in der Bilanz unberücksichtigt; dennoch wurden innerhalb der Berechnung sowohl die CO₂-Anteile des Kalksteins als auch der übrigen Rohmehlkomponenten inklusive Abfallstoffe berücksichtigt (siehe Abbildung 28).

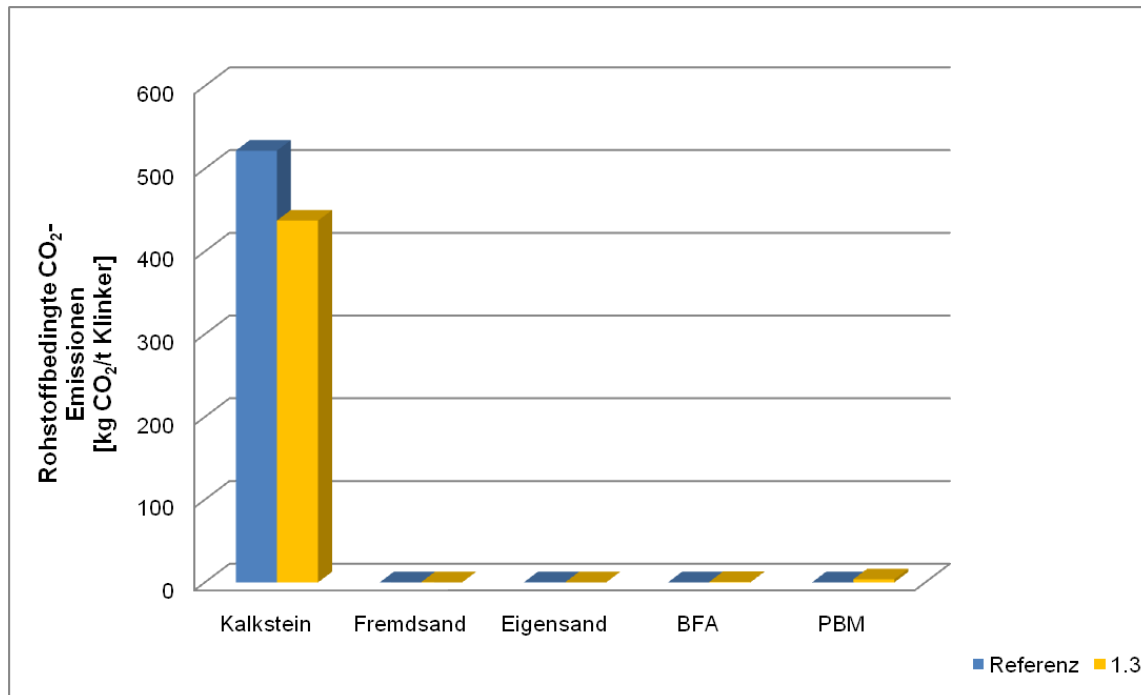


Abbildung 28: Graphische Darstellung der CO₂-Emissionen innerhalb des Referenzszenarios und Szenario 1.3, resultierend aus der thermischen Verarbeitung der Rohmehlkomponenten; BFA: Braunkohleflugasche, PBM: Porenbetonmehl

Es ist ersichtlich, dass das Ergebnis im Vergleich zu den übrigen Komponenten im Rohmehl maßgeblich von der Entsäuerung des Kalksteins bestimmt wird, welche mit > 99 % zu den rohstoffbedingten Emissionen beiträgt. Auf Grund des geringen CO₂-Anteils der übrigen Komponenten, v.a. hinsichtlich der früheren thermischen Behandlung der Abfallstoffe, ist hier kaum ein Einfluss auf die CO₂-Bilanz zu erwarten.

Vergleicht man die in Abbildung 5 dargestellten Szenarien, so lässt sich folgende Schlussfolgerung treffen: im Falle des Szenario 1.3 sinkt der Kalksteingehalt im Rohmehl im Vergleich zum Referenzszenario um ca. 10 %; daraus resultiert eine CO₂-Reduktion von ca. 15 %. Der Ersatz des Kalksteins durch Sekundärstoffe leistet allein hinsichtlich der resultierenden rohstoffbedingten Emissionen einen entscheidenden Beitrag zum CO₂-Reduktionspotential.

6.2.4. Thermisch bedingte Emissionen: Brennstoffe

Im Falle des Brennstoffeinsatzes wurde, wie in Abschnitt 6.1.4 beschrieben, in erster Näherung von einer Reduktion des thermischen Energiebedarfes von 800 kcal/kg Klinker auf 700 kcal/kg Klinker ausgegangen. Daraus resultiert eine Reduktion der brennstoffbedingten Emissionen um ca. 13 % (siehe Abbildung 29)

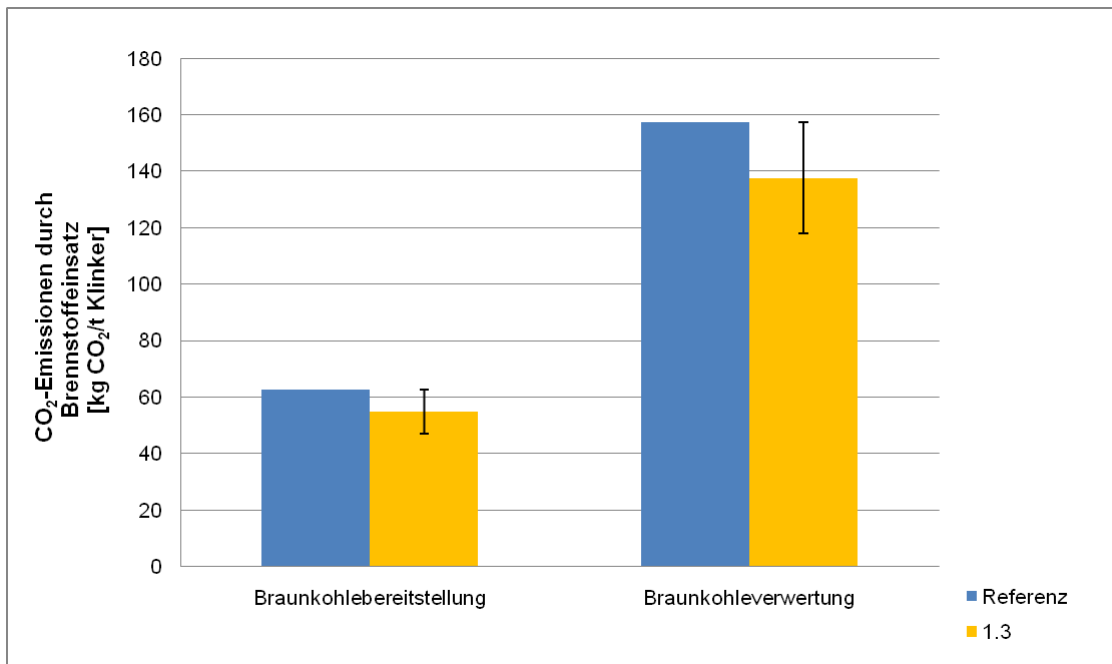


Abbildung 29: Graphische Darstellung der CO₂-Emissionen innerhalb des Referenzszenarios und Szenario 1.3, resultierend aus der Braunkohlebereitstellung und –verwertung (Braunkohlestaub)

Abbildung 29 enthält ferner die während der Braunkohlebereitstellung (Gewinnung und Transport) resultierenden, prozessbedingten CO₂-Emissionen; diese betragen ca. 1/3 der brennstoffbedingten Emissionen durch Braunkohleverwertung. Der Anteil von Transportprozessen während der Bereitstellung der Brennstoffe beträgt dabei kleiner 3 %.

Unter Berücksichtigung eines theoretischen Wärmeverbrauches im Bereich von 600 bis 800 kcal/kg Klinker im Falle der Alternativszenarien ergibt die Sensitivitätsanalyse eine Variation der CO₂-Emissionen durch Brennstoffeinsatz (Bereitstellung und Verwertung) um +/- 14 %. Dies würde einer Verbesserung bzw. Verschlechterung der CO₂-Bilanz von +/- 4 % entsprechen und sich somit, wie oben erwähnt, nur marginal auf diese auswirken.

Vergleicht man die dargestellten Emissionen mit den übrigen prozessbedingten Emissionen in Abschnitt 6.2.2, so bestätigt sich auch hier wieder der marginale Einfluss der Rohmehlbereitstellung und der Transportprozesse. Der Beitrag von Transportprozessen zur Bereitstellung von Sekundärbrennstoffen auf die CO₂-Bilanz ist demnach als vernachlässigbar gering einzuschätzen.

6.3. Zusammenfassung

Begleitend zur Entwicklung von nachhaltigeren Rohmehlszenarien zur Klinkerherstellung, zur Identifizierung von ökologischen Schwachstellen und Darstellung von Verbesserungsmöglichkeiten wurde eine vergleichende Bewertung der resultierenden CO₂-Bilanz verschiedener Szenarien durchgeführt. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Bestimmung des fossilen Kohlenstoffdioxids als Treibhausgas, während der Anteil des biogenen CO₂ im Falle der in Ecoinvent v2.2 enthaltenen Dateninventare bei unter 3 % liegt und als neutral betrachtet wurde.

Es konnte gezeigt werden, dass sich der Einsatz von Abfallstoffen aus anderen Industriezweigen positiv auf die CO₂-Bilanz der Zementklinker-Herstellung auswirkt: durch den anteiligen Ersatz von CO₂-haltigen Rohstoffen, so insbesondere von Kalkstein, ist eine CO₂-Reduktion von insgesamt 14 % realisierbar (vgl. Referenz und Szenario 1.3). Zudem werden natürliche Rohstoffe geschont und die Problematik der Deponierung der Sekundärstoffe verringert.

Der Vergleich der Szenarien am Beispiel des bevorzugten Szenario 1.3 zeigt, dass durch zusätzliche Transportprozesse zur Bereitstellung der eingesetzten Abfallstoffe ein Mehraufwand im Falle der

Alternativszenarien zu verzeichnen ist, der in einer erhöhten CO₂-Emission resultiert. Berücksichtigt man jedoch nachfolgende Prozessschritte, sind der Anteil der Bereitstellung der Ausgangsmaterialien und damit der Einfluss von Transportprozessen der Abfälle auf die Gesamtbilanz marginal (< 2 %). Dies gilt gleichfalls für Aufbereitungsprozesse unter Einsatz elektrischen Stromes; der Anteil der indirekten CO₂-Emissionen infolge des Stromverbrauches während des Brechens und Mahlens der Rohmehlkomponenten beträgt etwa 2 %. Die CO₂-Bilanz wird dagegen maßgeblich von der Kalksteinsäuerung (Anteil von ca. 67 %) und Brennstoffverwertung (Anteil von ca. 21 %) dominiert. Durch eine veränderte Rohmehlzusammensetzung ist eine Reduzierung des Energiebedarfs während nachfolgender Prozessschritte zur Darstellung zum Zementklinker zu erwarten. Quantifiziert werden konnte das in erster Näherung im Falle des spezifischen Wärmeverbrauches während des Ofenprozesses; durch eine Reduktion um 100 kcal/kg Zementklinker ist eine Reduktion der brennstoffbedingten CO₂-Emissionen um 13 % zu erwarten.

Eine weitere Reduktion des Energiebedarfes ist nicht auszuschließen. Es wird davon ausgegangen, dass sich eine veränderte Rohmehlzusammensetzung auf die den Ofen vor-, aber auch nachgelagerten Anlagenteile, z.B. Verarbeitung der Rohstoffe, Abgasreinigung und Kühlung, entsprechend auswirkt. So wäre eine Reduktion der CO₂-Emissionen mit einem geringeren Energiebedarf zur Abgasreinigung und damit einem weiteren positiven Effekt auf die resultierende CO₂-Bilanz verbunden. Auch die Einsparung von Brennstoffen, auf Grund des geringeren Energiebedarfes für die Entsäuerung des Kalksteins, und die damit verbundene Reduktion der Abgasmenge blieben in der Bilanz bislang unberücksichtigt.

Um die Qualität der Datenbasis abschätzen sowie Unsicherheiten/Schwachstellen ermitteln und einer entsprechenden Sensitivitätsanalyse unterziehen zu können, wurde daher in Anlehnung an das Instrument der Pedigree-Matrix ⁶³ auf einer Skala von 1 bis 5 eine semi-quantitative Bewertung der Datenqualität hinsichtlich der relevanten Indikatoren Zuverlässigkeit, Vollständigkeit und zeitliche Korrelation vorgenommen (Tabelle 21).**

Tabelle 21: Einschätzung der Datenqualität nach Indices 1-5 anhand einiger Indikatoren (Zuverlässigkeit, Vollständigkeit und Zeitliche Korrelation) einer Pedigree-Matrix

<i>Daten hinsichtlich</i>	<i>Bewertung der Datenqualität hinsichtlich (Zuverlässigkeit, Vollständigkeit, Zeitliche Korrelation)</i>
<i>Rohmehl</i>	
Quantität (Mengenbedarf der Rohstoffe)	(1,1,3)
Qualität (Vollanalyse der Rohstoffe)	(1,1,3)
Herkunft der Materialien	(1,1,3)
Einsatzfaktoren	(1,1,3)
<i>Energiebedarf</i>	
Elektrische Energie	(1,3,3)
Brennstoffenergie	(3,4,2)
<i>Emissionen während Brennprozess</i>	
Rohstoffbedingt	(1,1,3)
Brennstoffbedingt	(3,4,2)

⁶³ B.P. Weidema, M.S. Wesnaes. Data quality management for life cycle inventories – an example of using data quality indicators. Journal of Cleaner Production 4, 167-174, 1996

** Die Zuordnung der Daten auf der Bewertungsskala erfolgt nach den im Anhang vorgegebenen, projektbezogenen Kriterien (Tabelle 21)

Da die vorhandenen brennstoffbezogenen Daten auf der Grundlage von Berechnungen und Annahmen ermittelt wurden und bislang nicht experimentell verifiziert wurden, vor allem hinsichtlich der Differenzierung der Alternativszenarien, wurden sie bezüglich ihrer Zuverlässigkeit mit dem Index 3 versehen. Ferner sind die Daten hinsichtlich Energiebedarf und folglich auch brennstoffbedingter Emissionen unvollständig sowie unzureichend in Abhängigkeit der Szenarien differenziert. Daher wurden diese Daten einer Sensitivitätsanalyse unterzogen, wobei sich zeigte, dass eine Variation um +/- 100 kcal/kg Klinker vernachlässigbar geringen Einfluss auf die CO₂-Bilanz hat und die Gesamtaussage bestehen bleibt. Auch im Falle der Daten zum elektrischen Energiebedarf führte eine entsprechende Sensitivitätsanalyse zu keinen neuen Erkenntnissen. Selbst eine Erhöhung des elektrischen Energiebedarfes um 100 % würde lediglich einer Verbesserung der CO₂-Bilanz um ca. 2 % entsprechen - der CO₂-Anteil im Rohmehl stellt die dominierende Einflussgröße auf die CO₂-Bilanz und damit das größte Optimierungspotential dar.

In weiterführenden Arbeiten, insbesondere in Hinblick auf eine großtechnische Implementierung der optimierten Rohmehlzusammensetzung, sollten diese Aspekte jedoch ihre Berücksichtigung finden, zumal neben ökologischen auch ökonomische Vorteile entstehen können.

Zukünftige Arbeiten sollten ferner einen größeren Bilanzrahmen umfassen; so ist es beispielsweise von großem Interesse, wie sich die erhaltenen Zementklinker großtechnisch hinsichtlich der Zugabe von Mahl- und Hilfsstoffen, Energieeintrag etc. verarbeiten lassen, und inwiefern sich eine mögliche Differenzierung in Abhängigkeit vom Klinker auf das Ergebnis der ökologischen Bewertung auswirkt. Mit Hilfe einer detaillierteren und umfassenderen Datengrundlage sollte es ferner möglich sein, dieses Screening in eine Ökobilanz unter Betrachtung weiterer Wirkkategorien münden zu lassen. So ist zu erwarten, dass sich für die ökobilanziellen Wirkkategorien, z.B. die Kategorien des abiotischen Ressourcenverbrauches oder der Flächeninanspruchnahme, unter Berücksichtigung von Gutschriften, die durch den Wegfall der Deponierung der Abfallstoffe entstehen, Vorteile im Vergleich zum Referenzszenario ergeben werden.

7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die im direkten Vergleich eines Referenz- und eines Alternativrohmehlsszenarios die prinzipielle technische Gleichwertigkeit beider Zementklinker sowie die hiermit erreichbare CO₂-Emissionsminderung bewertet. Die Ergebnisse zeigen die prinzipielle Realisierbarkeit eines erhöhten Anteils von Sekundärrohstoffen, spezielle der Braunkohleflugasche, im Zementrohmehl. Maßgebend für eine großtechnische Umsetzung ist darüber hinaus die Wirtschaftlichkeit des veränderten Produktionsprozesses. Diese Wirtschaftlichkeit definiert sich dabei für jeden Standort der Zementproduktion neu und ist im Wesentlichen von den Faktoren

- **Rohstoffkosten** aus Abbau oder Zukauf und Transport
- Kosten zur Erzeugung der notwendigen **Brennenergie**
- Kosten zum Erwerb zusätzlich notwendiger **CO₂-Zertifikate**

Diese Hauptfaktoren sind für den Referenzstandort in Tabelle 22 als Relation beider Rohmehlsszenarios angegeben. Hierin erhöhen sich die Kosten für Abbau/Zukauf und Transport der Rohstoffe um 28 %. Diese Erhöhung setzt sich durch einen positiven Beitrag (Erhöhung) durch den Einkauf und Transport der Braunkohlenflugasche sowie einen sehr geringen Beitrag durch den möglichen Verzicht auf den konventionellen Eisenträger zusammen. Der maßgebliche Kostenfaktor ist hierbei der Transport der BFA vom Kraftwerk zum Standort der Zementproduktion. Für die Kalkulation wurde dabei ein Transport per Bahn angesetzt, welcher sich durch einen Aufschlag von ca. 15 € pro Tonne BFA in der Bilanz niederschlägt.

Tabelle 22: Relation der Kosten zwischen dem Referenz- und dem Alternativszenario

	Rohstoffmix + Transport % pro 1 t Klinker	Brennenergie % pro 1 t Klinker	CO ₂ -Emission % pro 1 t Klinker
Klinker 1.3	1,28	0,88	0,86
Referenz	1,00	1,00	1,00

Den erhöhten Materialkosten stehen die Faktoren Brennenergie (Tabelle 20) und CO₂-Emission (Abbildung 28) positiv gegenüber. Die Kosten für die Reduktion der Brennenergie wurden in der Kalkulation aufgrund des komplexen Brennstoffmixes nicht quantifiziert. Den deutlich effektiveren Kostenhebel stellt zudem die variierende CO₂-Emission dar. Die sich hieraus ergebenden Kosteneinsparungen sind dabei zum einen vom tagesaktuellen Preis für eine CO₂-Zertifikat (z.B. EUA) und der Produktionsmenge abhängig. Eine Entwicklung wichtiger Zertifikate gibt die Abbildung 30 wieder. Für die Kalkulation zur Wirtschaftlichkeit wurde ein Zertifikatspreis (EUA) von 12 €/t angesetzt.

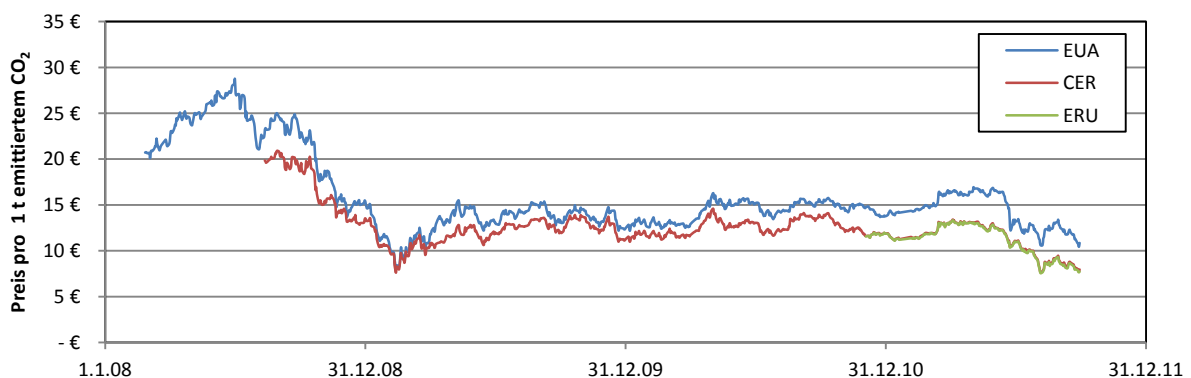


Abbildung 30: Kostenentwicklung wichtiger CO₂-Zertifikate seit 2008, Quelle: BLUENEXT

Die Abschätzung der Gesamtkosten (Rohstoffe und Zertifikate, ohne Brennergiedifferenz) zeigt in Abbildung 31, dass beim aktuellen Preisniveau der Emissionszertifikate und einer angenommenen Jahresproduktion an Klinker das Alternativszenario mit steigender Produktionsmenge kostenintensiver ist. Nach der überschlägigen Kalkulation verhalten sich beide Szenarien bei einem CO₂-Zertifikatspreis von 21 € preisneutral. Höhere Zertifikatspreise, wie sie nach Abbildung 30 im Jahre 2008 bereits erreicht wurden, erlauben deutliche wirtschaftliche Vorteile beim Einsatz des alternativen Szenarios 1.3. Diese, jährlich anfallende Kostenersparnis erlaubt auch eine ergänzende Modifikation der bestehenden Anlagentechnik eines Zementwerkes bzgl. des durch die BFA eingetragenen Schwefels und des damit verbundenen erschwerten Produktionskreislaufes (siehe Abschnitt 3.2.1). Die großtechnische Realisierbarkeit der ausgearbeiteten Rohmehlzusammensetzung aus der Perspektive eines Zementherstellers ist somit maßgeblich von der Entwicklung des Emissionshandels über das Jahr 2012 hinaus abhängig.

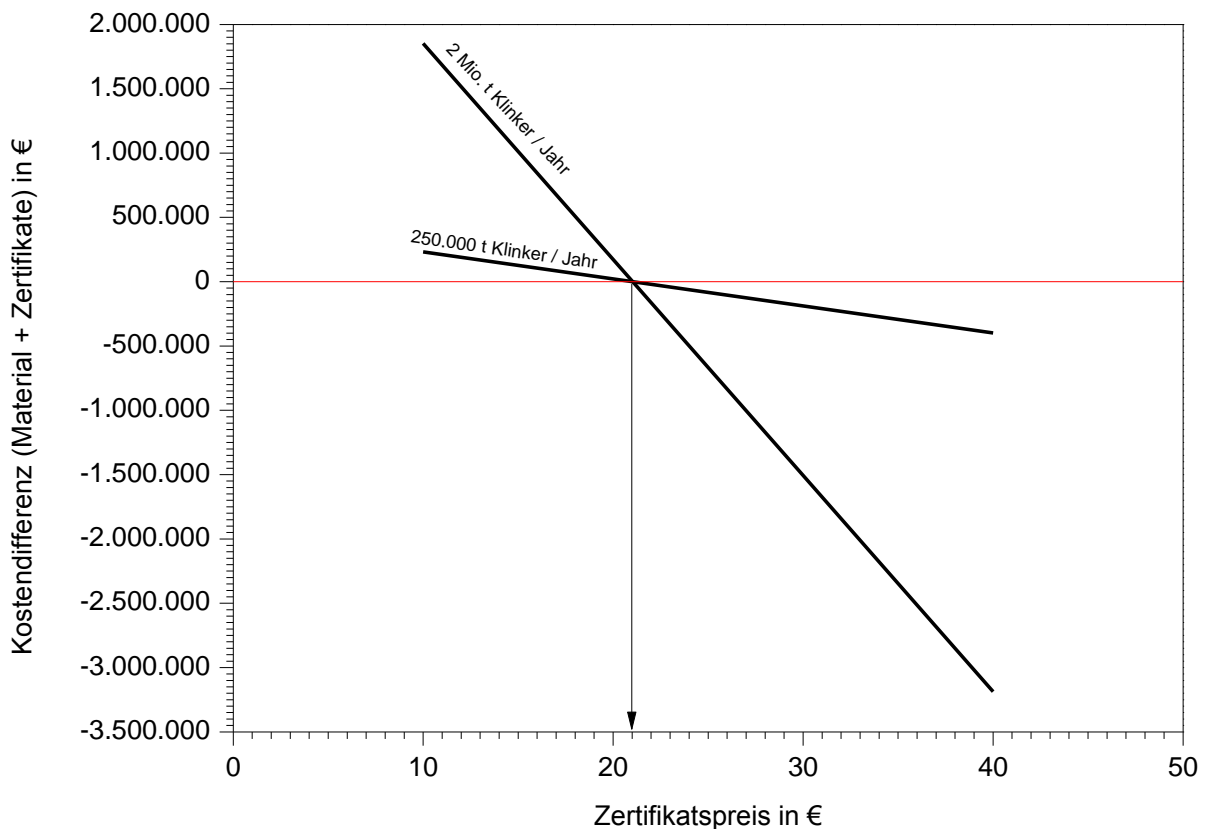


Abbildung 31: Abschätzung der entstehenden Kostendifferenz zwischen Szenario 1.3 und der Referenz in Abhängigkeit des CO₂-Zertifikatspreises

Literatur

- (1) Quelle: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, *World Population Prospects - the 2010 Revision*, <http://esa.un.org/unpd/wpp/Excel-Data/population.htm>
- (2) Quelle: International Energy Agency: Cement Technology Roadmap 2009. Carbon emissions reduction up to 2050. International Energy Agency., http://www.iea.org/papers/2009/Cement_Roadmap.pdf
- (3) Kieser, J.; Kraeher, B.; Gathemann, B. (1979): Modell zur Bestimmung der Rohmehlreaktivität unter praxisähnlichen Bedingungen. In: *Zement-Kalk-Gips*, S. 442-447
- (4) Setzer, M.; Fagerlund, G.; Janssen, D. J. (1996): CDF-Test - Prüfverfahren des Frost-Tau-Widerstandes von Beton mit Taumittel-Lösung (CDF). Rilem Recommendation. Unter Mitarbeit von M. Setzer, G. Fagerlund und D. J. Janssen.
- (5) Seidel, Gottfried; Huckauf, Horst; Stark, Jochen (1978): *Brennprozeß und Brennanlagen*, 1. Aufl.
- (6) Merkel, Th (2008): *Statistik zur Erzeugung und Nutzung von Eisenhüttenschlacken 2007*. In: FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e. V. (Hg.): 2008. FEhS Report, Duisburg
- (7) Merkel, Th (2010): *Das Wirtschaftsjahr 2009. Produktion und Einsatz von Hochofen- und Stahlwerksschlacke*. In: FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e. V. (Hg.): 2010. FEhS Report. Duisburg, S. 14.
- (8) Wolter, A.; Locher, G.; Geiseler, J. (2003): *Blast furnace slag (BFS) as a raw materials substitute for clinker burning*. In: VDZ Congress 2002. Process Technology of Cement Manufacturing, Process Technology of Cement Manufacturing. Düsseldorf. VDZ (Hg.) 2000 – Betontechnische Berichte, S. 361–367.
- (9) AG Energiebilanzen (2010): *BraunkohleDaten 2010*. Hg. v. AG Energiebilanzen. AG Energiebilanzen, <http://www.ag-energiebilanzen.de>
- (10) Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland; *Kohlekraftwerke: Neubau-Pläne, Widerstand und Erfolge*, http://www.bund.net/bundnet/themen_und_projekte/klima_energie/kohlekraftwerke_stopp_en/geplante_standorte/
- (11) BP Energy Outlook 2030, www.deutschebp.de
- (12) Shell energy scenarios to 2050, www.shell.com
- (13) World Energy Outlook 2010, <http://www.iea.org/weo/>
- (14) Vom Berg, Wolfgang; Lutze, Dietmar (2004): *Handbuch Flugasche im Beton. Grundlagen der Herstellung und Verwendung*, 1. Aufl, Düsseldorf, Verl. Bau und Technik
- (15) Schöffmann, H.: Gas-Bypass-Anlagen zur Beherrschung von Chlorid-Kreisläufen im Zementwerk. Lehrstuhl für Gesteinshüttenkunde, Montanunion Loeben.
- (16) www.kohlestatistik.de
- (17) Feuerborn, Hans-Joachim (2007): *Mittel- und ostdeutsche Braunkohlenflugaschen in hydraulischen Bindemitteln*, 1. Aufl, Aachen
- (18) VDZ: *Verwertung von Braunkohleaschen*. In: VDZ Tätigkeitsbericht 2001-2003, S. 64–66, <http://www.vdz-online.de/>
- (19) Pflug, Wolfram (1998): *Braunkohlentagebau und Rekultivierung. Landschaftsökologie - Folgenutzung - Naturschutz* ; mit 205 Tabellen. Springer Verlag, Berlin.

- (20) Puch, K.-H (13. und 2006): *Kraftwerksnebenprodukte*, BMU-Workshop zu den Anforderungen an die ordnungsgemäße und schadlose Verwertung mineralischer Abfälle, Bundesumweltministerium. Bundesumweltministerium, Bonn, 13. und 14.02.2006.
- (21) Alloway, B. J. (1999): *Schwermetalle in Boden - Analytik, Konzentration, Wechselwirkungen*. Springer Verlag, Berlin
- (22) Merkel, Th (2010): *Das Wirtschaftsjahr 2009. Produktion und Einsatz von Hochofen und Stahlwerksschlacke*. In: FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e. V. (Hg.): FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e. V. (Hg.) 2010. FEhS Report. Duisburg, S. 14.
- (23) Technische Regeln für Gefahrenstoffe (TRGS) 613, Oktober 2002: *TRGS 613 - Ersatzstoffe, Ersatzverfahren und Verwendungsbeschränkung für chromathaltige Zemente und chromathaltige zementhaltige Zubereitungen*
- (24) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: *Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes*, Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen, 17. BImSchV, vom 23.11.1990.
- (25) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: *Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft*
- (26) Zwar, H. (2005): MV-Schlacke – Mehr als nur ein ungeliebter Baustoff?, In: Müll und Abfall, Jg.: 37, Nr.3, 2005, S. 114-12
- (27) Beck, R.; Kröger, W. (2005): *Aschen aus der Müllverbrennung. Baustoff auf Deponien oder Abfall zur Ablagerung?*,Hg.: Bayrisches Landesamt für Umweltschutz
- (28) Bahadir, M.; Parlar, H.; Spittler, M. (2000): *Springer Umweltlexikon*, 2. Aufl, Springer Verlag, Berlin
- (29) Niculae, G. (2008): *Investigations on heavy metals during co-incineration*, In: ZKG International 61 (11), S. 60–67.
- (30) tel. Auskunft des Bundesverbandes der PB-Industrie
- (31) DIN EN 197-1, 08-2004: *Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normzement*
- (32) Taylor, H. F. W. (1997): *Cement chemistry*. 2nd. Thomas Telford, London
- (33) IBUtec advanced materials AG: *Reaktivitätsuntersuchung am Rohmehl*, interne Arbeitsvorschrift. Hg.: IBUtec advanced materials AG, Weimar.
- (34) Dressel, D.; Stark, J. (2010): *Modern grinding aids and their influence in the hydraulic properties of GBFS*. In: ZKG International 63 (2), S. 43–54.
- (35) Prüfung von Festbeton – Teil 3: *Druckfestigkeit von Probekörpern*; Deutsche Fassung EN 12390-3:2009
- (36) Prüfung von Festbeton - Teil 2: *Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen*; Deutsche Fassung EN 12390-2:2009
- (37) Prüfung von Frischbeton - Teil 5: *Ausbreitmaß*; Deutsche Fassung EN 12350-5:2009
- (38) Prüfung von Frischbeton - Teil 7: *Luftgehalt - Druckverfahren*; Deutsche Fassung EN 12350-7:2009
- (39) Mellwitz, R. (2011): *AVA - Bestimmung der Luftporengröße und -verteilung des Frischbetons am Beispiel einer Betonstraße*, Betonbau.aktuell 2011, MfPA Weimar, Apolda, 10.02.2011.
- (40) Merkblatt, 08-2004: *Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton*

- (41) *Frostprüfung von Beton*, Merkblatt, 12/2004, Bundesanstalt für Wasserbau
- (42) ISO 14040: 2006, *Environmental management - Life cycle assessment – Principles and framework*, Brussels, Belgium, European Committee for Standardization, 2006
- (43) ISO 14044: 2006, *Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*, Brussels, Belgium, European Committee for Standardization, 2006
- (44) Fleischer G.; W. P. Schmidt, W. P. (1997): *Iterative screening LCA in an eco-design tool*. International Journal of Life Cycle Assessment 2, 20-24
- (45) Hochfeld, C.; Jenseit, W.: *Allokation in Ökobilanzen und bei der Berechnung des Kumulierten Energieaufwandes (KEA)*, Erarbeitung von Basisdaten zum Energieaufwand
- (46) Hunt, R. G.; Boguski T. K.; Weitz K.; Sharma A. (1998): *Case studies examining LCA Streamlining Techniques*. International Journal of Life Cycle Assessment 3, 36-42
- (47) Final Report of the SETAC-Europe Screening and Streamlining Working-Group, Society of Environmental Chemistry and Toxicology SETAC. Simplifying LCA: just a cut? Brussels, Belgium, 1997
- (48) *Verminderung der CO₂-Emissionen – Erklärungen zur Klimavorsorge*, Monitoring-Berichte der deutschen Zementindustrie, 2008-2009, Verein Deutscher Zementwerke e.V., Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, 2010
- (49) Chen, C.; Habert, G.; Bouzidi Y.; Jullien A. (2010): *Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation*. Journal of Cleaner Production 18, 478-485
- (50) Eyerer, P.; Reinhardt, H.-W. (2000): *Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden. Wege zu einer ganzheitlichen Bilanzierung*. Bau Praxis Birkhäuser
- (51) Kreißig, J.; Baitz, M.; Betz, M.; Eyerer, P.; Kümmel, J.; Reinhardt, H.-W. (1997): *Leitfaden zur Erstellung von Sachbilanzen in Betrieben der Steine-Erden-Industrie*
- (52) *Life Cycle Assessment (LCA) – Quo Vadis?*, S. Schaltegger, Birkhäuser Verlag, 1996
- (53) Kawai, K.; Sugiyama, T.; Kobayashi, K.; Sano, S. (2005): *Inventory Data and Case Studies for Environmental Performance Evaluation of Concrete Structure Construction*, Journal of Advanced Concrete Technology 3, 435-456
- (54) Angaben eines deutschen Zementwerkes (Referenzszenario), Februar 2010
- (55) Umberto v5.5, 2007. ifu Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH; ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH; Deutschland
- (56) Ecoinvent database by Frischknecht et al., v2.2, 2010, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Schweiz
- (57) Durchschnittswerte zementproduzierender Werke, Verbund- bzw. Direktvertrieb: 0,04 kg Wasser/kg Klinker bzw. 0,2 kg Wasser/kg Klinker, Werte erhalten von IBU-tec, Dipl. Ing. S. Vogel, März 2011
- (58) Vollanalyse der Rohstoffe, IBU-tec, Dr. J. Kieser, März 2010
- (59) zur Strassen, H.: *Der theoretische Wärmebedarf des Zementbrandes*, Zement - Kalk - Gips 10, 1 – 12, 1975
- (60) Mündliche Information, IBU-tec, Dr. J. Kieser, März 2010
- (61) Schriftliche Information, IBU-tec, Dipl.-Ing. S. Vogel, März 2011
- (62) Bundeseinheitliche Liste der CO₂-Emissionsfaktoren (bezogen auf den unteren Heizwert), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2003
- (63) Weidema, B.P.; Wesnaes, M.S. (1996): *Data quality management for life cycle inventories – an example of using data quality indicators*, Journal of Cleaner Production 4, 167-174

Anhang

Anhang A: chemische Analysen betrachteter Anfallstoffe

Tabelle 23: Mittelwerte der chem. Vollanalysen

	Im Rahmen der Laborbrennversuche betrachtete Anfallstoffe, Analysenmittelwerte der Stichproben IBUtec und BUW							nur im Rahmen der Vorauswahl betrachtet, Stichprobenanalyse BUW				
	BFA KW Schkopau	BFA KW Lippendorf	BFA KW Schwarze Pumpe	LD-Schlacke Duisburg	Porenbetonmehl	Quarzsand	Kalksteinmehl	BFA KW Tisová, Tschechien	LDS Völklingen	EOS Unterwellenborn	Pfannenofenschlacke Unterwellenborn	Rauchgasasche MVA Erfurt
Glühverlust 1000°C	0,3	0,5	3,2	4,2	12,8	1,4	39,4	5,7	1,97	0	0	43,3
SiO₂	24,6	35,3	37,9	10,9	53,2	78,8	6,3	32,2	12,4	10,5	21,4	2,6
Al₂O₃	13,6	15,3	14,2	3,4	2,8	11,0	2,6	20,7	1,0	6,3	14,1	1,0
Fe₂O₃	7,8	4,0	5,6	26,6	1,1	1,7	0,9	4,3	27,1	54,7	1,1	0,6
CaO	39,6	31,7	28,9	40,6	26,6	0,4	48,3	24,4	43,9	19,9	53,9	42,9
MgO	4,0	4,7	3,0	9,4	0,4	0,6	0,8	0,6	2,1	3,6	7,0	0,5
TiO ₂	0,6	1,24	0,87	0,88	0,1	0,17	0,08	4,12	0,45	n.b.	0,22	0,03
MnO	0,15	0,17	0,17	2,66	0,02	0,01	0,01	0,06	3,63	5,99	0,53	0,17
K ₂ O	0,38	0,38	0,44	0,03	0,7	3,92	0,68	0,33	0,04	0,08	0,02	2,45
Na ₂ O	0,23	0,23	0,26	0,09	0,34	1,93	0,26	0,54	0,06	0,19	0,06	1,94
SO₃	8,6	5,3	5,4	0,2	1,8	0,0	0,7	7,8	0,3	0,43	0,7	3,3
P ₂ O ₅	0,08	1,08	0,12	1,03	0,09	0,17	0,04	0,53	n.b.	n.b.	0,05	0,48
Cr ₂ O ₅									4,20	2,95		
Cl _{gesamt}	0,004	0,005	0,007	0,013	0,014	0,012	0,029	-	-	-	-	-
TIC	0,015	0,038	0,05	0,177	0,92	0,004	10,4	-	-	-	-	-
TOC	0,064	0,139	0,061	0,005	0,28	0,032	< 0,01	-	-	-	-	-

Anhang B: Mineralphasenbestand der Anfallstoffe mittels QXR

Table 24: Mineralphasenbestand der betrachteten Anfallstoffe

	BFA Schkopau	BFA Lippendorf	BFA Schwarze Pumpe	LD-Schlacke Duisburg	Porenbetonmehl	Sand 1	Sand 2	Kalksteinmehl
röntgenamorpher Anteil	24,15	32,65	41,53	21,52	38,01			
Anhydrite	12,61	8,43	4,72		1,47			0,42
C ₂ AS Gehlenite	3,89	7,24	6,02					
C ₂ S beta Mu_wenig	8,07	5,88	5,76	11,38				
C ₃ A Na cubic	6,35	6,37	4,39					
C ₃ A Na orthorhombic	1,08	1,87	0,91					
C ₄ AF Brwonmillerite	8,42	0,00	6,37	15,55				
Ca ₄ Al ₆ O ₁₂ SO ₄	3,03	1,87	0,95					
CaO	9,99	8,88	2,28	3,33				
Calcite	-		0,00		5,78			94,93
Eitelite	-	1,57	0,00					0,66
Forsterite (Fe)	0,86		0,00					
Kaolinite							0,56	
Magnetite	7,46	4,31	4,45					
Muscovite	-		0,00			2,55		2,95
Orthoclase							1,14	
Orthoclase Albite						24,46		
Periclase	1,80	2,31	1,08	0,83				
Plagioclase Albite						16,44		
Plag Albite high K0.25		1,49						
Portlandite	1,47	0,97	1,56	7,65				
Quarz korr.	10,81	16,16	19,98	0,20	23,36	56,54	98,3	1,54
Tobermorite					31,38			
Wuestite				39,53				

Anhang C: Eckdaten der Betonrezepturen

Tabelle 25: Eckdaten der Betonrezepturen

	Rezeptur 1	Rezeptur 2	Rezeptur 3	Rezeptur 4
angestrebte Betonfestigkeitsklasse	C 30/37	C 30/37	C 30/37	C 35/45
Zementgehalt, kg/m ³	340	310	350	350
Betonzusatzstoff, -	-	SFA	-	-
Gehalt an Betonzusatzstoffen, kg/m ³	-	50	-	-
w/z, -	0,60	0,59	0,49	0,45
w/z _{eq} , -	0,60	0,55	0,49	0,45
Betonzusatzmittel, -	BV	BV	FM LP	FM
Dosiermenge Betonzusatzmittel, M. % v.Z.	0,60	0,60	0,25 0,18	0,80
Größtkorn der Gesteinskörnung, mm	16	16	16	16
Sieblinienbereich, -	A/B 16	A/B 16	A/B 16	A/B 16
Mehlkorngehalt, kg/m ³	340,4	360,6	350,4	350,5

Anhang D: Zuordnung der Datenqualität auf der Bewertungsskala (Datenqualitätsindices)

Tabelle 26: Zuordnung der Datenqualität auf der Bewertungsskala (Datenqualitätsindices)

Bewertungs- skala	1	2	3	4	5
Zuverlässig- keit	Verifizierte Daten, auf Messungen beruhend	Verifizierte Daten, teilweise basierend auf Annahmen	Nicht- verifizierte Daten, die teilweise auf qualifizierten Annahmen beruhen	Qualifizierte Abschätzun- gen, z.B. durch Experten	Nicht- qualifizierte Abschätzungen
Vollständig- keit	Vollständige, repräsentative, verifizierte Datenlage	Vollständige, repräsentative, nicht- verifizierte*** Datenlage	Unvollständige Datenlage, vorhandene Daten sind verifiziert und repräsentativ	Unvollständige und nicht- verifizierte*** Datenlage, Repräsentativ- ität nicht bekannt	Repräsen- tativität unbekannt, keine Daten bzw. lediglich Abschätzungen vorhanden
Aktualität zum Zeitpunkt der Auswertung	Verifizierte, aktuelle Daten, < 6 Monate	Nicht- verifizierte, aktuelle Daten (basierend auf eigenen Berechnungen/ Abschätzun- gen), < 6 Monate	Verifizierte Daten, 6-24 Monate	Verifizierte Daten, > 24 Monate (älter als Projektlaufzeit)	Alter der Daten unbekannt oder keine Daten

*** Daten auf Grundlage von Berechnungen und qualifizierten Annahmen erhoben