

Identifizierung der Zementart in hydratisierten Betonen und Mörteln

Einleitung

Ziel des Forschungsprojektes ist es, eine Methode zur Identifizierung der in einem Festbeton oder -mörtel vorliegenden Zementart zu entwickeln. Dazu werden die durch eine geeignete Probenpräparation angereicherten Zementsteine bei verschiedenen Temperaturen getempert, um einen charakteristischen Zementphasenbestand zu erzeugen. Anschließend werden die Temperprodukte chemisch sowie phasenanalytisch untersucht. Aus diesen drei Hauptarbeitsschritten leitet sich auch die Kurzbezeichnung der Methode ab: ATA – Anreicherung-Temperaturbehandlung-Analyse.

Die Ermittlung der Zementart ist aus folgenden Gründen von Interesse:

- Betonschäden, welche an Bauwerken während ihrer Nutzungsdauer auftreten, sind häufig auf eine unzureichende Dauerhaftigkeit des Zementsteins bzw. des Verbundes Zementstein – Zuschlag zurückzuführen. Da die Behebung solcher Schäden in den meisten Fällen mit einem erheblichen Kostenaufwand verbunden ist, sind nicht selten Rechtsstreitigkeiten hinsichtlich von Schadensursache bzw. -verursacher die Folge. In diesen Fällen könnte die zweifelsfreie Bestimmung der in dem betreffenden Beton oder Mörtel verwendeten Zementart sehr hilfreich sein.
- Bei bestimmten Sanierungsarbeiten besteht die unabdingbare Voraussetzung, die ursprünglich verwendeten Materialien zu kennen. Auch hier wäre eine Methode für die eindeutige Identifizierung der Zementart hilfreich.

Die heutige Vorgehensweise zur Festbetonanalyse folgt der DIN 52170 zur Bestimmung des Zuschlaggehaltes im Mörtel oder Beton. Schlüsse auf die Zementart sind ggf. aus der chemischen Analyse möglich, wobei versucht wird, den Zuschlageinfluß durch anreichernde Probenaufbereitung zu minimieren. In anderen Methoden, z.B. die von Dorner [1] beschriebene, werden Zuschläge durch selektive Lösungsverfahren eliminiert. Dabei werden nicht carbonatisierte Bestandteile von Zementstein und hydratisierter Flugasche durch überschüssige Essigsäure gelöst. Carbonatische Bestandteile, also auch Kalksteinzuschläge bleiben zurück. Damit kann an Betonen mit Kalksteinzuschlägen der Zuschlaggehalt bestimmt werden.

Merkmale und Entwicklungsschritte der ATA-Methode zur Zementidentifizierung

Anreicherung

Die Identifizierung der durch die Temperaturbehandlung rückgebildeten Zementphasen ist an bestimmte Nachweisgrenzen gebunden. Diese Grenzen sind von der jeweiligen Nachweismethode abhängig. Im gegebenen Fall, in dem vorwiegend die Röntgendiffraktometrie zum Einsatz kam, zeigt sich, daß der Gehalt des Zementsteines in einem Mörtel oder Beton mit ca. 35 % bis 15 % zu gering ist. Dies trifft in erster Linie für die Identifizierung der Phasen zu, die im Zement nur in geringen Konzentrationen vorliegen, z.B. die Aluminat- und die Ferritphase. Aus diesem Grund wurden im Vorfeld der eigentlichen Temperungsversuche Untersuchungen angestellt, die das Ziel verfolgten, in den Beton- und Mörtelproben den Zementstein gegenüber den Zuschlägen so weit wie möglich anzureichern.

In der ersten Etappe der Untersuchungen zur Zementsteinanreicherung wurden Methoden der klassischen Zerkleinerung in Kombination mit einer Siebtrennung angewandt. Dabei kommen die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften von Zementstein

und Zuschlag einer Aufschlußzerkleinerung entgegen. In der überwiegenden Anzahl der Fälle weisen bei normalen Betonen und Mörteln die Zuschläge bedeutend höhere Festigkeiten auf als der Zementstein. Dies macht sich bei der Zerkleinerung in einer Anreicherung des Zementsteins in den feinen Kornfraktionen bemerkbar, die genutzt werden kann, um Proben mit Zementsteingehalten bis zu 75 % zu präparieren.

Temperaturbehandlung

Während der Temperaturbehandlung kommt es zu verschiedenen Zersetzungsreaktionen im Zementstein und zu Phasenneubildungen. Während die bei den Zersetzungsreaktionen ablaufenden Umwandlungen im wesentlichen bekannt sind [2], gibt es zu den Phasenneubildungen im Temperaturbereich über 1000 °C nur wenige Angaben. Dazu kommt, daß die auftretenden Effekte sehr vielfältig sind und sich teilweise überlagern. Deshalb war es zunächst notwendig, einzelne Effekte isoliert zu betrachten. Aus diesem Grund wurde das Versuchsprogramm auf drei Abstraktionsebenen angelegt.

Die erste Ebene weist dabei den höchsten Abstraktionsgrad auf. Hier wurden lediglich das Hydratations- und Dehydratationsverhalten von reinen Klinkerphasen untersucht. Damit sollte zunächst die Frage beantwortet werden, ob die Hydratation durch eine thermische Behandlung vollständig rückgängig gemacht werden kann und bei welcher Temperatur diese Reversibilität erreicht wird. Einflüsse von Zuschlägen wurden durch die Verwendung von Pasten ausgeschlossen.

Auf Abstraktionsebene 2 wurden Zementsteine aus realen Zementen analysiert. Diese Analysen sollten Aufschluß darüber geben, wie sich die einzelnen Phasen während ihrer Dehydratation gegenseitig beeinflussen und welche Rolle gegebenenfalls Zuschlagstoffe und Füller spielen.

Erst auf der dritten Abstraktionsebene waren wie in realen Betonen und Mörteln auch Zuschläge präsent. So sollte es gelingen, Effekte, die durch die Zuschläge ausgelöst werden, gesondert zu erfassen.

Analyse

Der dritte Schritt der ATA-Methode ist die Analyse der Proben nach der thermischen Behandlung im Hinblick auf ihren Mineralbestand. Als Analysenmethode für die rückgebildeten Zementphasen kommt die Röntgendiffraktometrie zum Einsatz. Der während der Temperung entstehende freie Kalk, der ebenfalls als Unterscheidungsmerkmal genutzt wird, wird mit der Methode nach FRANKE bestimmt.

Zur Beurteilung des bei der Probenpräparation erreichten Anreicherungseffekts kann die Bestimmung des Gehaltes an Zementstein und Zuschlag nützlich sein. Der Gehalt an Zuschlag kann in Anlehnung an die DIN 52170 bestimmt werden, indem der Zementstein mittels Salzsäure aufgelöst wird und der Zuschlag als unlöslicher Rückstand zurückbleibt. Dieses Verfahren ist allerdings nur anwendbar, wenn der Zuschlag nachweislich in Salzsäure unlöslich ist, was für Mörtel und Beton mit Quarz-Zuschlägen zutrifft. Bei Kalksteinzuschlägen beispielsweise ist eine Bestimmung des Zuschlaggehaltes auf diese Art und Weise nicht möglich.

Untersuchungen zu den Einflußfaktoren auf die ATA – Methode

Den Kern der ATA-Methode bildet die Temperung, durch die ein charakteristischer, für die Identifizierung geeigneter Phasenbestand erzeugt werden muß. Über die sich daraus ergebenden Unterscheidungsmöglichkeiten wurde bereits an anderer Stelle berichtet [3,4,5,7,8]. Um die Parameter für die Temperung festlegen zu können, müssen

die aus den Untersuchungsbedingungen herrührenden Einflüsse auf die Phasenrückbildung bekannt sein. Im wesentlichen werden

- die Probenpräparation bzw. der resultierende Zementstein- und Zuschlaggehalt oder der Anreicherungsgrad und
- die Behandlungstemperatur sowie die Haltezeit

die Phasenrückbildung beeinflussen. Dabei müssen die Bedingungen so gewählt werden, daß die Beteiligung der Zuschläge an Rückbildungsreaktionen so weit wie möglich vermieden wird, während die Entstehung von Zementphasen, die für die Identifizierung geeignet sind, so weit wie möglich gefördert wird.

In systematischen Untersuchungen an insgesamt vier Zementen wurde insbesondere den Fragen nachgegangen, unter welchen Temperbedingungen sich die Zuschläge an der Reaktion beteiligen und wie sich der Phasenbestand in Abhängigkeit von den Temperbedingungen verändert. Dazu wurde an Mörtelprismen der mit konventionellen Zerkleinerungs- und Trennmethode erreichbare Anreicherungsgrad ermittelt. Anschließend wurden die Proben, die einen unterschiedlichen Anreicherungsgrad aufwiesen, bei verschiedenen Temperaturen zwischen 600 °C und 1100 °C getempert. Die Dauer der Temperung wurde zwischen 0,5 h und 2 h variiert.

Nach der Anreicherung bzw. der Temperung wurden die Proben mit den genannten, bei der ATA anzuwendenden Analysemethoden untersucht.

Einfluß der durch die Probenpräparation erzielten Anreicherung

Der Zuschlaggehalt beträgt bei Mörteln durchschnittlich 70-75 %, bei den meisten Betonen liegt er noch höher. Da sich die Analysen zur Bestimmung der Zementart auf den Zementstein beziehen, dessen Anteil an der zu analysierenden, unangereicherten Probe aber durch den Zuschlag auf etwa 30 % sinkt, können unter Umständen jene Bestandteile des Zementsteins, die nur in geringer Konzentration (ca. < 10 %) vorliegen, nicht mehr zweifelsfrei identifiziert werden. Um dem entgegenzuwirken, muß eine Anreicherung des Zementsteins gegenüber den Zuschlägen vorgenommen werden.

In früheren Untersuchungen [6] wurde der Einfluß der Beanspruchungsart auf die Anreicherung untersucht. Dabei wurde festgestellt, daß nur geringe Unterschiede zwischen Druck-, Prall- und Scherbeanspruchung bestehen. Die Zerkleinerung im Backenbrecher bzw. in der Hammermühle erbrachte das günstigste Verhältnis zwischen erreichtem Aufschlußgrad und notwendigem Aufwand.

In den hier beschriebenen Versuchen wurden die Mörtelprismen mittels eines Laborbakkenbrechers zerkleinert und danach durch eine Siebtrennung in eine feine, zementsteinreiche und eine grobe, zuschlagreiche Fraktion getrennt. Im gegebenen Fall wurde die Anreicherung durch Siebschnitte bei 63 µm, 90 µm und 250 µm vorgenommen. Im Vergleich dazu wurden der nicht angereicherte Mörtel sowie der jeweilige Zementstein ohne Zuschläge in die Untersuchungen einbezogen. Der Zuschlaggehalt wurde durch Extraktion mit verdünnter Salzsäure bestimmt.

Wie aus Abbildung 1 hervorgeht, läßt sich durch Siebschnitte bei 250 µm, besonders aber bei 90 und 63 µm eine deutliche Erhöhung des Zementsteingehaltes erreichen. Dabei zeigen der Portlandzement und der Hochofenzement nahezu gleiche Ergebnisse. Um eventuellen Unterschieden im Anreicherungsresultat Rechnung zu tragen, werden in der Folge alle quantitativen Analyseergebnisse auf glühverlustfreie Substanz umgerechnet.

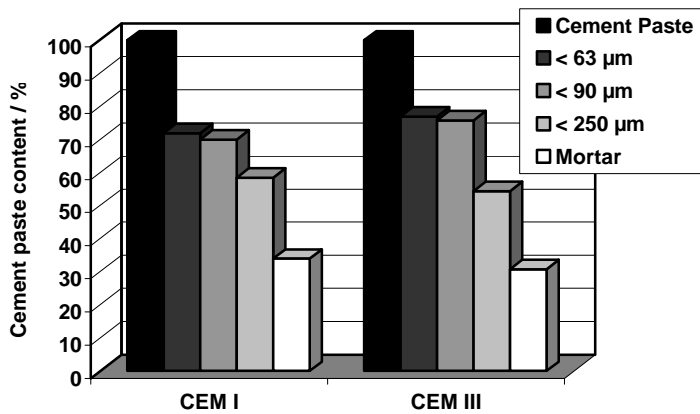


Abbildung 1: Zementsteingehalt für verschiedene Anreicherungsstufen vor der thermischen Behandlung

Neben dem Verdünnungseffekt wird durch die Zuschläge die chemische Zusammensetzung des zu tempernden Stoffgemisches gegenüber dem Zementstein als dem für die Identifizierung eigentlich interessierenden Bestandteil grundlegend verändert. Dies erlangt dann Bedeutung, wenn es – aufgrund der hohen Behandlungstemperaturen – zu einer Reaktionsbeteiligung der Zuschläge kommen sollte.

Grundsätzliche Informationen über mögliche Phasenrück- oder Neubildungen können dem Dreistoffsystem $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ bzw. dem Zweistoffsystem CaO-SiO_2 entnommen werden.

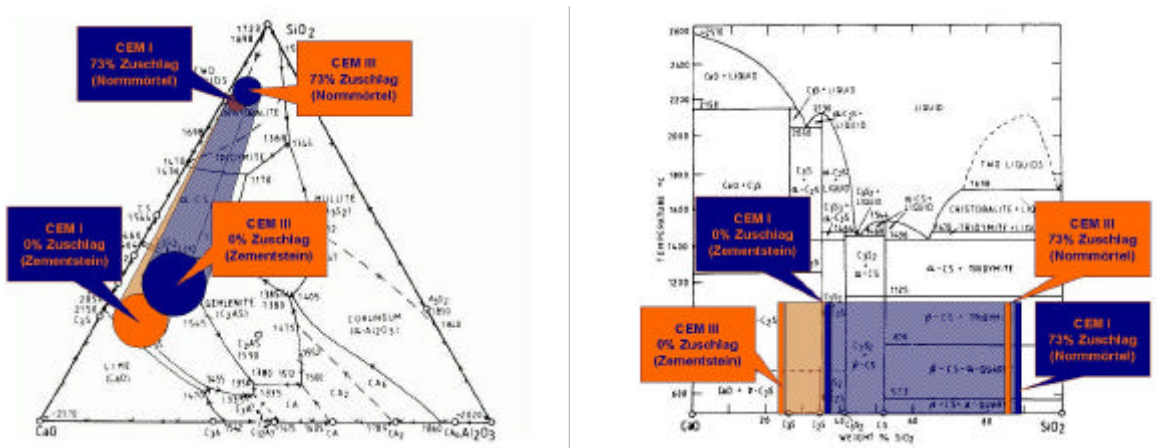


Abbildung 2. Verschiebung der chemischen Zusammensetzung durch die Zuschläge in den Phasendiagramme $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ und CaO-SiO_2

Wie Abbildung 2 erkennen läßt, erfolgt durch den Zuschlag eine Verschiebung entlang der CaO-SiO_2 -Achse. Dargestellt sind jeweils für einen CEM I und einen CEM III die Bereiche, welche die chemische Zusammensetzung der jeweiligen Probe repräsentieren. Dabei stehen Proben aus reinen Zementsteinen (0% Zuschlag) unangereicherte Mörtelproben (73 % Zuschlag) gegenüber. Erstgenannte wären maßgebend für den Fall, daß der Zuschlag an den Reaktionen während der thermischen Behandlung nicht beteiligt ist, letztere für den Fall, daß der gesamte Zuschlag reagiert. Dazwischen befindet sich ein Feld, das in Frage kommt, wenn nur ein Teil des Zuschlages an den Reaktionen beteiligt ist.

Für reine Mörtel wäre bei vollständiger Reaktionsbeteiligung der Zuschläge neben Quarz noch das kalkarme Silikat Wollastonit (CS) zu erwarten. Für den Fall, daß sich nur ein Teil der Zuschläge an der Reaktion beteiligt, könnten als Neubildungen Wollastonit (CS), Rankinit (C_3S_2), Gehlenit (C_2AS), Dicalciumsilicat (C_2S) und Tricalciumsilicat (C_3S) neben Quarz nachweisbar sein. Bei Berücksichtigung der Stabilitätsbereiche dieser Verbindungen [9] und der angewandten Temperaturen von maximal 1100 °C ist allerdings nur die Bildung von CS, C_3S_2 , C_2S und C_2AS zu erwarten.

In Abbildung 3 wurden die HCl-unlöslichen Rückstände der bei 1100 °C getemperten Zementsteine und Mörtel verschiedener Anreicherungsstufen über den HCl-unlöslichen Rückständen der unbehandelten Proben, die auf auf glühverlustfreie Substanz umgerechnet wurden, dargestellt. Wie sich erkennen läßt, scharen sich alle Wertepaare im wesentlichen um die Gerade $y = x$. Die berechnete Regressionsgerade $y = 0,9696x + 0,0579$ liegt geringfügig darunter. Das deutet auf eine geringe Reaktionsbeteiligung der Zuschläge hin, bei der aus den unlöslichen Bestandteilen lösliche Verbindungen entstanden sind.

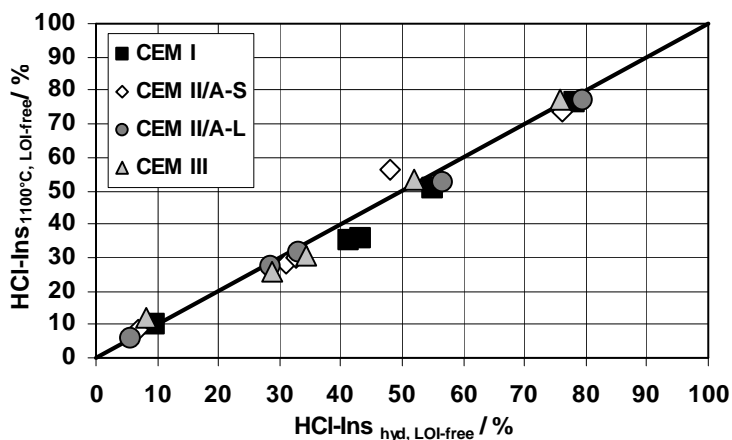


Abbildung 3: Gegenüberstellung von HCl-unlöslichem Rückstand vor und nach der Temperaturbehandlung bei 1100 °C

Einfluß der Temperbedingungen

Bei der Temperung wurden sowohl der Einfluß der Behandlungstemperatur als auch der Einfluß der Haltezeit auf die Dehydratation und die Phasenrückbildung untersucht. Dabei wurden wiederum Proben mit unterschiedlichem Anreicherungsgrad – vom Zementstein bis zum Mörtel – einbezogen. Die Veränderungen im Phasenbestand wurden summarisch anhand des CaO_{frei} -Gehalts bzw. halbquantitativ mittels XRD erfaßt.

Als Behandlungstemperaturen wurden 600 °C, 900 °C, 1000 °C und 1100 °C ausgewählt. Dabei repräsentiert 600 °C in etwa die Temperatur, bei der die ersten Zersetzungsreaktionen als abgeschlossen betrachtet werden können. Laut [2] erfolgen erste Zersetzungsreaktionen der C-S-H – Phasen bereits im Bereich bis 250 °C. Allerdings entstehen dabei nicht sofort wieder die ursprünglichen Klinkerphasen C_3S und C_2S sondern Zwischenphasen mit geringeren Ca/Si - Verhältnissen. Als obere Temperatur wurde 1100 °C gewählt, da unterhalb dieser Temperatur mit hoher Wahrscheinlichkeit keine Schmelzphasenbildung unter Beteiligung der Zuschläge auftritt.

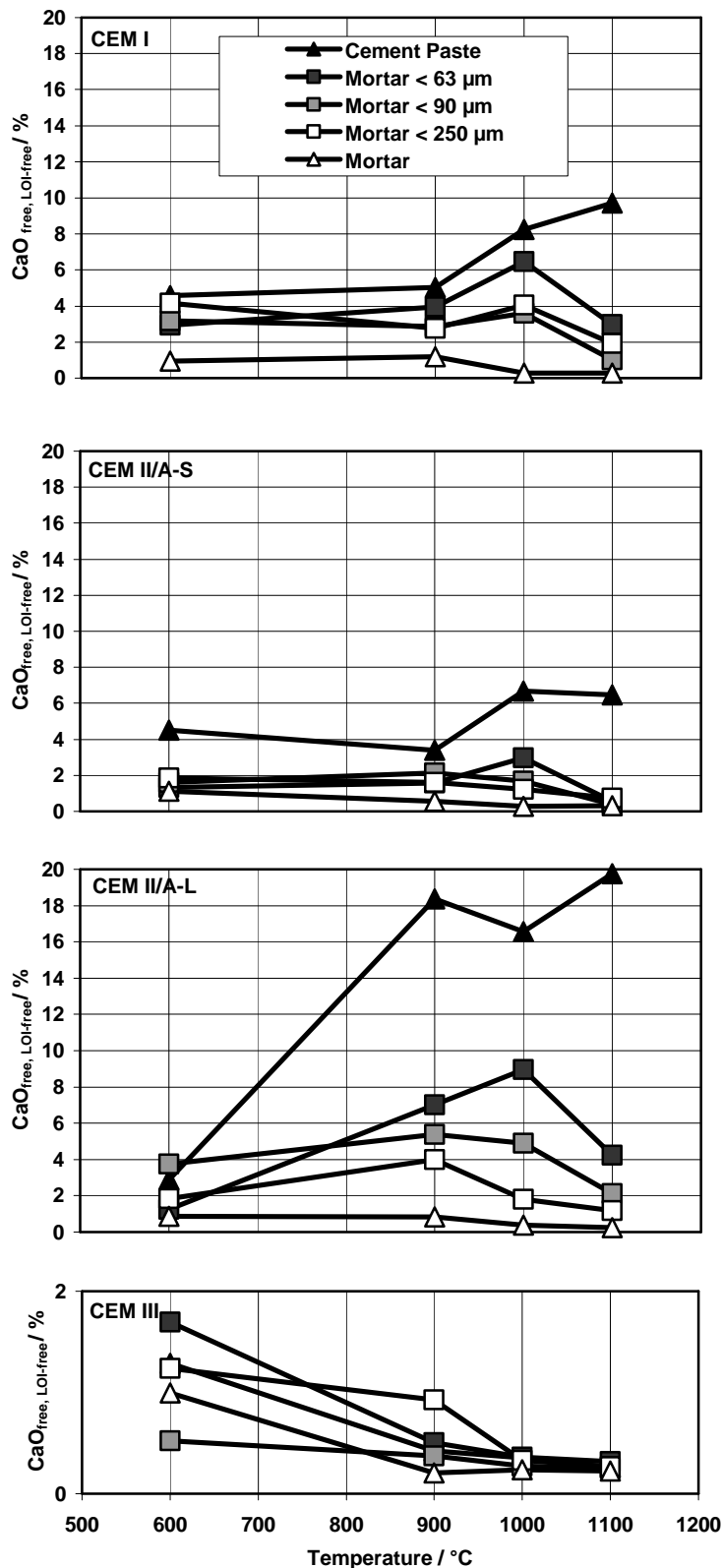


Abbildung 4: Auf glühverlustfreie Substanz bezogener Gehalt an freiem Kalk in Abhängigkeit von der Behandlungstemperatur

Die Freikalkgehalte von Zementsteinen und Mörteln verschiedener Anreicherungsstufen der vier untersuchten Zemente sind in Abbildung 4 dargestellt.

Danach sind die Gehalte an freiem CaO in den getemperten Proben sowohl von der jeweiligen Zementart als auch von der Behandlungstemperatur abhängig. Aus der Abbildung ergeben sich folgende Aussagen und Schlußfolgerungen zum Einfluß der Zementart:

- Die CaO_{frei} -Gehalte für die getemperten Zementsteine des Portlandzementes CEM I nehmen im Bereich zwischen 600 °C und 900 °C nur unwesentlich zu. Oberhalb von 900 °C kann eine deutliche Zunahme des CaO_{frei} -Gehaltes verzeichnet werden. Bei 1100°C beträgt der CaO_{frei} -Gehalt ca. 10 %. Die CaO_{frei} -Zunahme mit steigender Temperatur wird durch die Zersetzung der Hydratationsprodukte verursacht, der keine, zu den ursprünglichen Klinkerphasen, insbesondere zum Alit zurückführende Phasenneubildungen gegenüberstehen. Dadurch entsteht ungebundener Kalk.
- Die getemperten Zementsteine des Hochofenzementes weisen deutlich geringere CaO_{frei} -Gehalte von unter 2 % auf, die ein signifikantes Unterscheidungsmerkmal zu dem Portlandzement darstellen und auf den geringeren Portlandzementklinkeranteil zurückzuführen sind. Aus der CaO_{frei} -Abnahme mit steigenden Temperaturen läßt sich schließen, daß der freie Kalk, der aus der Zersetzung der C-S-H-Phasen des Portlandzementklinkeranteils stammt, sofort wieder gebunden wird. Als Reaktionspartner kommen noch nicht hydratisierte Hüttensandanteile oder Zersetzungsprodukte der kalkärmeren C-S-H-Phasen, die bei der Hydratation des Hüttensandes gebildet wurden, in Frage.
- Bei dem Zement CEM II/A-S, welcher einen – verglichen mit dem CEM III – hohen Portlandzementklinkeranteil aufweist, ist eine Überlagerung der Effekte des CEM I und des CEM III zu erkennen. Der Gehalt an freiem Kalk beträgt nach der 1100 °C-Temperung 6,5 %.
- Besonderheiten weist der Zementstein des CEM II/A-L auf. Hier kommt es infolge der Decarbonatisierung des zugemahlten Kalksteins zu wesentlich höheren CaO_{frei} -Gehalten von bis zu 20 %. Bereits im Bereich unterhalb von 900 °C ist eine deutliche Erhöhung des Gehaltes an freiem Kalk zu verzeichnen.

Der Einfluß des Zuschlags auf die während der Temperung ablaufenden Reaktionen läßt sich aus den veränderten Abhängigkeiten des CaO_{frei} -Gehalts von der Temperatur ablesen. Für die Zemente CEM I, CEM II/A-S und CEM II/A-L stehen sich ab 1000 °C ein ansteigender bzw. konstanter CaO_{frei} -Gehalt für die getemperten Pasten und ein abnehmender CaO_{frei} -Gehalt für die Mörtel bzw. die Pasten mit Zuschlagrückständen gegenüber. Daraus kann gefolgert werden, daß bei Temperaturen oberhalb von 1000 °C der freie Kalk auch mit Teilen des Zuschlages reagiert.

Detailliertere Aussagen zu Veränderungen im Phasenbestand gehen aus den röntgenografischen Analysen hervor. Wie das Beispiel des Portlandzements in Abbildung 5 zeigt, kommt es bei 600 °C lediglich zu einer Zersetzung des bei der Hydratation gebildeten Portlandits. Die dominierenden Phasen im Temperaturbereich von 900 bis 1100 °C sind Belit und freier Kalk. Letzterer resultiert aus der CaO-Differenz zwischen dem im Ausgangszement vorhandenen Alit und dem rückgebildeten Belit. Bei 1400 °C kommt es zur Alitrückbildung aus dem Belit und dem freiem CaO, dessen Gehalt demzufolge abnimmt. In Mörteln finden analoge Phasenumwandlungen statt. Die Reaktion von freiem Kalk mit Teilen der Zuschläge, die in Mörteln stattfindet, konnte wegen der zu geringen Intensitäten der Reaktionsprodukte röntgenografisch nicht nachgewiesen werden.

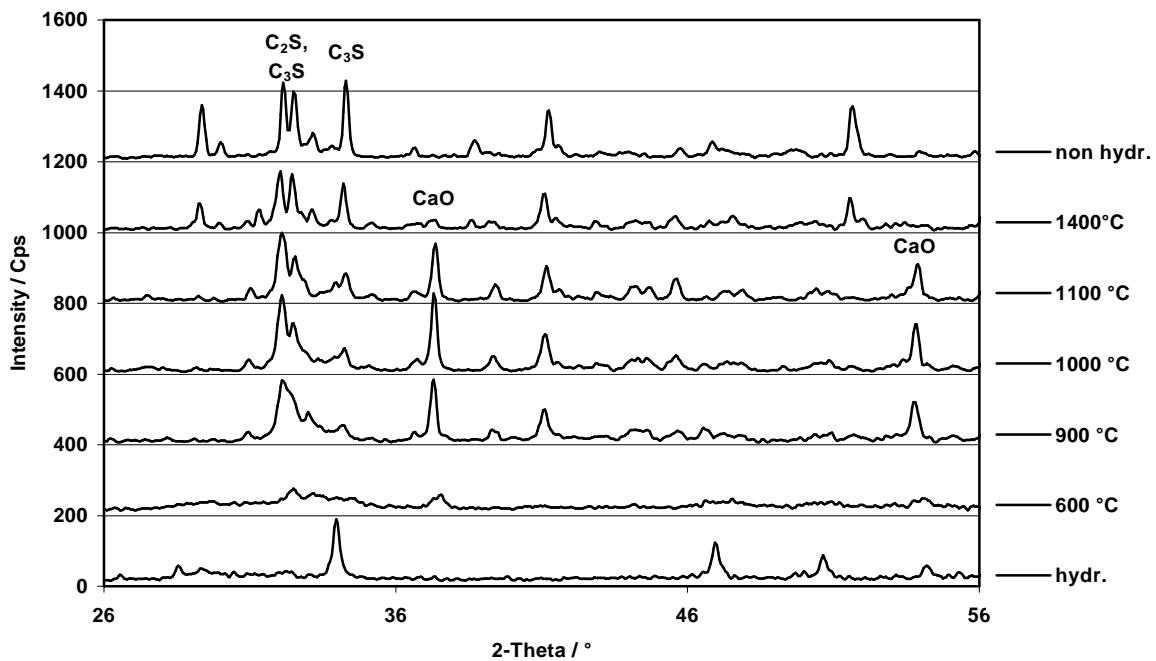


Abbildung 5: Röntgendiagramme eines Zementsteins aus Portlandzement im hydratisierten Zustand, bei verschiedenen Behandlungstemperaturen und im nicht hydratisierten Zustand

Im Unterschied zum Temperatureinfluß wurde der Einfluß der Haltezeit nur für die Anreicherungsstufe mit ca. 70 % Zementstein gemessen.

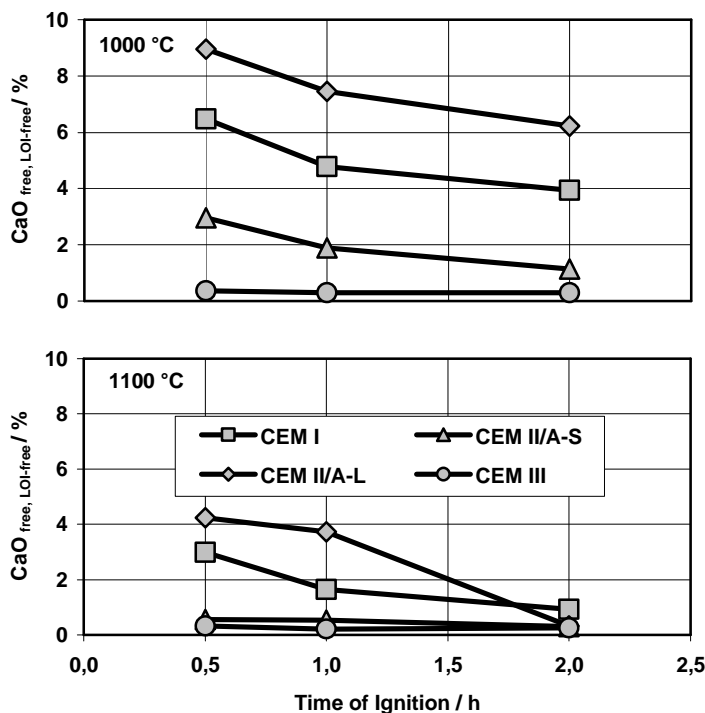


Abbildung 6: Auf glühverlustfreie Substanz bezogener Gehalt an freiem Kalk der untersuchten Zemente in Abhängigkeit von der Glühzeit

Die Abhängigkeiten (Abbildung 6) zeigen, daß bereits bei einer Behandlungstemperatur von 1000 °C ein Abfall der Freikalkwerte mit steigender Glühzeit auftritt. Auch dies deutet darauf hin, daß der freie Kalk mit Teilen der Zuschläge reagiert.

Fazit

Ziel der vorgestellten Untersuchungen war es, optimale Behandlungsbedingungen für angereicherte Zementsteine zu ermitteln, aus denen sich eine möglichst große Anzahl von Unterscheidungsmöglichkeiten zwischen verschiedenen Zementarten ergibt, die für eine Identifizierung mittels ATA-Methode genutzt werden können.

Dabei konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Der Anreicherungsgrad der zu tempernden Probe hat wesentlichen Einfluß auf die Identifizierungsmöglichkeiten. Dabei ist es günstig, so viel Zementstein wie möglich in der Probe zu haben. Da mit den bisherigen Anreicherungsverfahren bei einer Absiebung unterhalb von 90 µm kaum noch nennenswerte Verbesserungen erreicht werden konnten, wird eine Siebtrennung bei 90 µm unter Berücksichtigung des Verhältnisses von Aufwand und Nutzen momentan als günstig eingeschätzt. Dabei werden Zementsteingehalte von etwa 70 % erreicht.
- Der Einfluß der Temperungsdauer ist eher gering. Da die ungewollte Reaktion des Zementsteins mit Teilen des Zuschlages mit zunehmender Bahandlungsdauer wahrscheinlicher wird, sich demgegenüber aber keine Nachteile bei der Phasenrückbildung aus dem hydratisierten Zementstein zeigten, wird eine Temperungsdauer von 30 Minuten als günstig eingeschätzt.
- Den größten Einfluß auf die Phasenrückbildung und –neubildung besitzt die Behandlungstemperatur. Dabei ist es wichtig, diese einerseits hoch genug zu wählen, daß alle für die Zement-Identifizierung notwendigen Phasenrückbildungen stattfinden können, andererseits aber niedrig genug zu halten, um Reaktionen mit den Zuschlägen weitestgehend auszuschließen. Da bei einer Behandlungstemperatur von 1100 °C offenbar schon Zuschlagreaktionen stattfinden, wird nach den momentanen Erkenntnissen die Behandlungstemperatur von 1000 °C als günstig angesehen. Wichtige Identifizierungsphasen wie Ye'elimit oder Gehlenit können bei dieser Temperatur ebenfalls bereits nachgewiesen werden.

Gegenwärtig werden Untersuchungen vorgenommen, mit dem Ziel, die Anreicherung des Zementsteins in den Analysenproben weiter zu verbessern. Dabei werden als alternative Zerkleinerungsmethoden die Schallimpulszerkleinerung [10] und die Beanspruchung der Proben mittels Ultraschll getestet. Außerdem soll geprüft werden, ob durch den Übergang von der Siebtrennung zu einer Dichtetrennung eine Verbesserung des Anreicherungsgrades erreicht werden kann.

Weiterhin ist in künftigen Untersuchungen die Übertragung der bisher gewonnenen Ergebnisse auf Betone und Mörtel auch mit Zuschlägen aus magmatischen Gesteinen und aus Kalkstein geplant.

Literatur

- [1] Dorner, H.W.; Festing, H.: Analyse von flugaschehaltigem Beton.
In: Schüttgut 4 (1998) Nr.2 S. 211-214
- [2] Maultzsch, M.: Die thermogravimetrische Analyse (TGA) in der Materialprüfung kunststoffmodifizierter Zementmörtel.
In: Materialprüfung 30 (1988), Nr. 5; S. 157-161
- [3] Splittgerber, F.; Müller, A.: Sekundärzemente aus dehydratisiertem Zementstein?
In: Baustoffrecycling + Deponietechnik 10/98 (1998), S. 9-10
- [4] Splittgerber, F.; Müller, A.: Identifizierung der Zementart in hydratisierten Betonen und Mörteln.
In: Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege 6. Jahrgang, Heft 2 (2000), S191-218
- [5] Müller, A.; Splittgerber, F.: Identification of the Type of Cement in Hardened Concrete and Mortars.
Extending Performance of Concrete Structures.
Proceedings of the International Seminar held at the University of Dundee, Scotland, UK on 7 September 1999
- [6] Müller, A.; Splittgerber, F.: Separation as a Requirement for a High Level Recycling of Building Rubble.
Exploiting Wastes in Concrete.
Proceedings of the International Seminar held at the University of Dundee, Scotland, UK on 7 September 1999
- [7] Splittgerber, F.; Müller, A.: Identifizierung der Zementart in hydratisierten Betonen und Mörteln.
In: 14. Internationale Baustofftagung (IB AUSIL), Tagungsbericht – Band 1, S. 443-454
- [8] Splittgerber, F.; Müller, A.: Identification of the Type of Cement in Hardened Concret and Mortars.
In: International Conference on Construction Hong Kong 2001, Conference Proceeding Volume One, S. 143-154
- [9] Gosh, S.N.: Advances in Cement Technology.
Pergamon Press Ltd. 1983, S. 95
- [10] Linß, E.; Müller, A.: Leistungsfähigkeit der Schallimpulszerkleinerung für die Präparation von Mörtel- und Betonproben.
Ibausil-Poster-Beitrag, September 2000