

SYMPOSIUM

14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 21. März 2018

Betone der Zukunft

Herausforderungen und Chancen



Ulrich Nolting, Frank Dehn, Michael Haist und Julian Link (Hrsg.)

SYMPOSIUM

Betone der Zukunft

Herausforderungen und Chancen

SYMPOSIUM

14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 21. März 2018

Betone der Zukunft
Herausforderungen und Chancen

Herausgegeben von
Ulrich Nolting, Frank Dehn, Michael Haist und Julian Link

Mit Beiträgen von

Matthias Achternbosch	Anne Heisig
Robert Adams	Franz-Josef Klager
Nancy Beuntner	Horst-Michael Ludwig
Wolfgang Breit	Christoph Müller
Frank Dehn	Norbert Pralle
Bianca Dornisch-Bund	Julia Scheidt
Michael Haist	Karl-Christian Thienel
Detlef Heinz	

Veranstalter:
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
76128 Karlsruhe
VDB – Verband Deutscher Betoningenieure e. V.
Regionalgruppen 9 und 10
InformationsZentrum Beton GmbH
Gerhard-Koch-Straße 2+4
73760 Ostfildern

Titelbildcollage

Alle Bilder von iStock, Obere Reihe: © zhaojiankang, Mittlere Reihe Links: © jm1366, Mittlere Reihe Mitte und Rechts: © eugenesergeev, unten: © bjdlsx

Hinweis der Herausgeber

Für den Inhalt namentlich gekennzeichnete Beiträge ist die jeweilige Autorin bzw. der jeweilige Autor verantwortlich.

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.
Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2018 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISBN 978-3-7315-0767-3

DOI 10.5445/KSP/1000080569

Vorwort

Die Bauwirtschaft und insbesondere der Betonbau unterliegen einem rasanten Wandel. Portlandzement wird zunehmend durch Ersatzstoffe wie Flugasche oder Hüttensand verdrängt. Bereits heute übersteigt die Nachfrage nach Ersatzstoffen das verfügbare Angebot. Diese Ressourcenknappheit führt neben Emissionsaspekten zur weltweiten Forschung an einer Vielzahl neuer Alternativen zu Portlandzement, deren aktuelle Entwicklungsstadien sich zwischen frühen Entwicklungsstufen und Marktreife befinden. Exakte Zukunftsprognosen sind schwer zu erstellen, jedoch scheinen in Zukunft einzelne Bindemittel wie Portlandzement durch Kombinationen aus mehreren, gezielt aufeinander abgestimmten Bindemitteln und Feinstoffen abgelöst zu werden. Auch ist absehbar, dass rezyklierte Gesteinskörnungen zukünftig eine stärkere Rolle bei der Betonherstellung spielen werden. Zielsetzung des 14. Symposiums Baustoffe und Bauwerkserhaltung ist es, Ihnen einen Überblick über diese Entwicklungen zu geben und diese hinsichtlich Ihrer Auswirkungen auf die zukünftige Betontechnologie sowie das zukünftige Bauen zu bewerten.

Das Programm der Veranstaltung beginnt mit der Vorstellung von Bewertungsmethoden, mit denen die Folgen von technischen Änderungen für einzelne Projekte, das eigene Unternehmen oder das Bauen insgesamt beurteilt und quantifiziert werden können. Da Calcium-Silikat-Hydrat auch in nahezu allen neuen Bindemittelansätzen weiterhin das maßgebende Hydratationsprodukt ist, wird im folgenden Vortrag die Struktur dieses Binders erläutert. Anschließend folgt eine Vorstellung der Möglichkeiten, die sich durch Zementersatzstoffe wie Gesteinsmehle, Hüttensand und Flugasche oder calcinierte Tone bieten. Nachfolgend werden Ihnen Alternativen zum Portlandzement vorgestellt und deren Potentiale beleuchtet. Auf die Einsatzmöglichkeiten der rezyklierten Gesteinskörnung und die Konsequenzen einer Verschiebung der normativen Regeln hin zu Performance-Konzepten wird in zwei weiteren Vorträgen eingegangen. Dem zeitlichen Wandel unterliegen auch die Anforderungen an Bauwerke und Baustoffe. Die Veranstaltung schließt daher mit einem Vortrag zur Zukunft des Bauens.

Die Veranstalter

Inhalt

	Vorwort	V
Matthias Achternbosch	Technikfolgenabschätzung zum Thema Betone der Zukunft – Herausforderungen und Chancen	1
Michael Haist	Calcium-Silikat-Hydrat – Unverzichtbarer Bestandteil von Beton	13
Christoph Müller	Dauerhafte Betone mit kalksteinhaltigen Zementen	21
Detlef Heinz Anne Heisig	Flugasche und Hüttensand – Zusatzstoffe mit Zukunft?	27
Karl-Christian Thienel Nancy Beuntner	Calcinierte Tone und ihr Potenzial für die moderne Betontechnologie	37
Horst-Michael Ludwig	Neuartige Bindemittel – Die Zeit nach dem Portlandzement	49
Wolfgang Breit Julia Scheidt Bianca Dornisch-Bund Robert Adams	Gesteinskörnung – Von natürlicher bis rezyklierter Körnung	61
Frank Dehn	Bemessungsrelevante Kennwerte zukünftiger Betone und deren Abbildung in Regelwerken	75
Norbert Pralle Franz-Josef Klager	Anforderungen an das Bauen der Zukunft aus Sicht eines Generalunternehmers – oder: Die Gestaltung der Bebauten (Um)Welt	81
	Programm der Veranstaltung	89
	Autorenverzeichnis	91
	Übersicht über Tagungsbände vergangener Symposien	93

Technikfolgenabschätzung zum Thema Betone der Zukunft – Herausforderungen und Chancen

Matthias Achternbosch

Zusammenfassung

In diesem Artikel werden Methoden der Technikfolgenabschätzung vorgestellt, die zur Bewertung von Entwicklungen neuartiger Bindemitteln eingesetzt werden können. Es wird aufgezeigt, dass es mit einer TA möglich ist, schon in einem frühen Stadium der Entwicklung einer Bindemittel-Technologie erste Antworten in Bezug auf Machbarkeit, Realisierungsbedingungen und CO₂-Einsparpotential zu geben. An den konkreten Beispielen Novacem und Celitement wird dies exemplarisch demonstriert.

Allgemein gilt, dass derzeit keine ausgeklügelte Lösung als Alternative für den universellen OPC in Bezug auf Masseneinsatz entwickelt ist. Die Umsetzung stößt u.a. deshalb an Grenzen, weil derzeit das Wissen über die Abläufe der Prozesse, die die Hydratation und Dauerhaftigkeit der Bindemittel-Systeme bestimmen, begrenzt ist. Aus unserer Sicht befinden wir uns derzeit in einer wichtigen Phase der Wissensgenerierung. Der Einsatz moderner analytischer Methoden und die Modellierung wird das Verständnis der Prozesse auch komplexerer Phasenzusammensetzungen weiter verbessern. Noch sind die Innovationszyklen und die Prüfprozeduren davon unbeeinflusst, so dass davon auszugehen ist, dass die Folgen des neuen Wissens und damit die Markteinführung neuer Systeme erst in einiger Zeit sichtbar werden. Auch wenn es viel versprechende Entwicklungen gibt, ist aus unserer Sicht trotz der Dringlichkeit der CO₂-Problematik eine globale Alternative zu konventionellem Zement als Massenbaustoff in den nächsten 10-15 Jahren nicht zu erwarten.

1 Allgemeines

Mit Methoden der Technikfolgenabschätzung wird versucht, die Chancen, Potentiale und Risiken von Technologien schon zu einem relativ frühen Stadium der Entwicklung abzuschätzen, mit dem Ziel, Entwicklern und Stakeholdern Entscheidungshilfen zur Verfügung zu stellen. Seit mehr als 10 Jahren untersucht die Arbeitsgruppe „Zementäre Bindemittel“ des Instituts für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) systemanalytisch Entwicklungen zu alternativen Zementen. An ausgewählten Beispielen sollen in diesem Beitrag Fragestellungen, Vorgehensweise und Ergebnisse der Technikfolgenabschätzung zu neuartigen Zementensystemen vorgestellt werden.

Aufgrund der breiteren Perspektive einer Technikfolgenabschätzung eignet sich der hier vorgestellte Beitrag sehr gut als Einführung in das komplexe Thema der Bewertung neuartiger Zementensysteme, die Basis für Betone der Zukunft sein könnten. Da solche Untersuchungen auch immer die vorgegebene „Landschaft“ in Betracht ziehen müssen, in die eine angedachte Technologie eingebettet werden soll, sind die Rahmenbedingungen zu analysieren, insbesondere um potentielle fördernde oder hemmende Faktoren früh zu identifizieren. Dies

schließt natürlich auch gesamtwirtschaftliche und gesellschaftliche Wandelprozesse mit ein.

Im Folgenden werden zuerst gesamtwirtschaftliche gesellschaftliche Trends dargelegt, die den Verlauf wesentlicher Einflussfaktoren für die Bauwirtschaft in Zukunft bestimmen werden. In diesem Kontext wird dargelegt, warum insbesondere der Klimaschutz ein wichtiger Treiber ist, neuartige Zement- und Betonsysteme zu entwickeln und welche Komplexität mit der Umsetzung dieser Anforderung verbunden ist. Im Anschluss werden die charakteristischen Merkmale, die angewandten Methoden und die Vorgehensweise einer Technikfolgenabschätzung vorgestellt. Dies soll an ausgewählten Beispielen näher erläutert werden.

2 Wirtschaftliche und gesellschaftliche Rahmenbedingungen - Trends

Im globalen Maßstab zählt die Bauwirtschaft zu den größten Wirtschaftssektoren. Das jährliche globale Bauvolumen wird derzeit auf 9000 Milliarden US Dollar geschätzt [1]. Bis zum Jahr 2025 wird mit einem Anstieg auf 15.000 Milliarden US Dollar gerechnet. Seit der internationalen Finanz- und Wirtschaftskrise im Jahr 2008 ist eine Verlagerung der Bauaktivitäten aus den Industrieländern in die

Schwellenländer, insbesondere China und Indien zu beobachten. Für die Industrieländer werden Wachstumsraten von jährlich 2% (in Westeuropa bei 1,2%) prognostiziert, außerhalb der OECD werden über 4% erwartet (in Asien ohne Japan und in der Golfregion sogar über 5%).

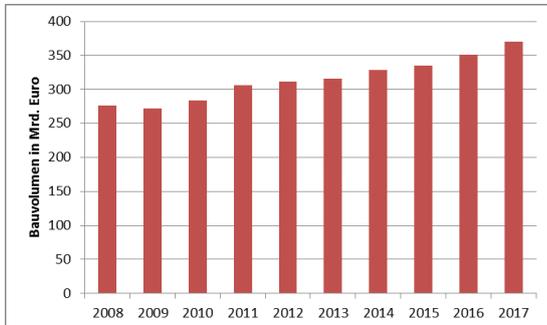


Abb. 1: Entwicklung des Bauvolumens in Deutschland [2]

Auch in Deutschland ist die Bauwirtschaft ein wesentlicher Wirtschaftssektor. Im Jahr 2016 hatten Baumaßnahmen rund zehn Prozent Anteil am deutschen Bruttoinlandsprodukt [3]. Das jährliche Bauvolumen, das die gesamte inländische Bauleistung in nominaler und realer Entwicklung beziffert, lag 2017 bei 370 Mrd. Euro [4]. Derzeit ist ein starker Bauaufschwung zu verzeichnen: Treiber sind der Wohnungs- und der Bundesverkehrswegebau. Die Wachstumsraten liegen für 2017/2018 bei 5-6%.

Die Bauwirtschaft steht zukünftig vor großen Herausforderungen. Die zukünftigen Rahmenbedingungen werden durch verschiedene gesellschaftliche Veränderungen und Trends im starken Maße beeinflusst. Wichtige Megatrends [5], die auch den Bereich Bauen und Wohnen nachhaltig verändern werden sind [6, 7]:

- die Urbanisierung,
- der demographische Wandel,
- der soziologische Wandel im Bereich Lebens- und Arbeitskultur,
- die Digitalisierung (Wissenskultur),
- Klimaschutz und Ressourceneffizienz (Nachhaltigkeit).

Während im Folgenden auf die ersten vier Punkte nur knapp eingegangen wird, sollen die Punkte Klimaschutz und Ressourceneffizienz eingehender behandelt werden.

2.1 Urbanisierung

Die Trends Urbanisierung und demographischer Wandel stellen soziologisch wichtige gesellschaftliche Wandlungsprozesse dar, die ohne das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung kaum zukunftsfähig gestaltet werden können. Derzeit leben in Deutschland rund 75% der Menschen in Städten. Prognosen

gehen davon aus, dass sich dieser Anteil bis 2050 auf 84% erhöhen wird [6]. Umgekehrt werden vor allem ländliche und wirtschaftlich schwache Regionen von Schrumpfung betroffen sein. Der seit Jahren zu beobachtende Zuzug in die Ballungszentren wird durch die Migrationsbewegungen noch einmal stark verstärkt. Mittelfristig wird erwartet, dass jährlich 500.000 Zuwanderer nach Deutschland kommen. Bei einer prognostizierten Bleibequote von 60-70% werden jährlich mindestens 350.000 neue Wohnungen benötigt. Es fehlt insbesondere in größeren und mittleren Städten Wohnraum. Ebenso sind kleine Wohnungen knapp, weil es mehr Singles gibt. Zudem wird mehr Flexibilität verlangt, so kann der Arbeitsplatz vom Standort des Privatlebens immer weiter entfernt sein. Die Gesellschaft wird immer mobiler werden müssen, wofür die Infrastruktur entsprechend angepasst werden muss. All diese Trends erfordern stärkere Aktivitäten des Bauwesens, dessen Beitrag zur Nachhaltigkeit zudem immer wichtiger wird.



Foto: Pixabay CC/PublicDomain

2.2 Demographischer Wandel

Der demographische Wandel stellt die Gesellschaft zudem vor weitere große Herausforderungen. Bei steigender Lebenserwartung kommen heute weniger Kinder auf die Welt als früher: Die Geburtenziffer liegt in Deutschland trotz eines Anstiegs mit 1,5 Kindern je Frau weiterhin unter dem Durchschnitt der Europäischen Union [8]. Die hiesige Bevölkerung wird zukünftig deutlich älter sein als jetzt: Prognosen gehen davon aus, dass 2060 jeder Dritte mindestens 65 Jahre alt sein wird. Dies bedeutet im Wohnungsbau eine verstärkte Ausrichtung auf altersgerechtes Wohnen mit einer entsprechenden Gestaltung von Wohnraum, Gebäuden und urbanen Infrastrukturen. Auch dies verstärkt den Druck in Richtung Zuzug in Städten, da dort eine bessere Anbindung an Einrichtungen im Gesundheits- und Pflegewesen möglich ist.

2.3 Digitalisierung

Nicht fehlen darf natürlich der Hinweise auf die zukünftige Bedeutung der Digitalisierung. Die Bauwirtschaft ist durch eine unterdurchschnittliche Produktivitätsentwicklung gekennzeichnet, diese

war in den Jahren 2000 bis 2011 mit 4,1% deutlich geringer als in der gesamten deutschen Wirtschaft (11%). Hier kann die Digitalisierung einen wichtigen Beitrag zur Prozessoptimierung der Bauabwicklung liefern. Digitale Planungsmethoden wie Building Information Modeling (BIM) dürften verstärkt genutzt werden. Intelligente Technologien im Bereich Gebäudetechnik (Smart Homes) bieten Chancen insbesondere bei Raumklima und Energie Management in Gebäuden.

2.4 Klimawandel und Ressourceneffizienz

Die Berichte des Weltklimarats (IPCC) zeigen eindrucksvoll, dass sich das Klima verändert und die beobachtete globale Erwärmung vorwiegend auf menschlichen Einflüssen beruht, insbesondere der Emission von Treibhausgasen. Heute ist die Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre so hoch wie noch nie in den vergangenen 800.000 Jahren. In Vereinbarungen zur Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) wie dem Kyoto-Protokoll konnten bislang nur die reichen Industrieländer dazu verpflichtet werden, ihre Treibhausgasemissionen zu senken. Im Pariser Übereinkommen vom 12. Dezember 2015 hat sich nun die gesamte Staatengemeinschaft dazu bekannt, Maßnahmen zu ergreifen, um den globalen Temperaturanstieg in diesem Jahrhundert deutlich unter 2 Grad Celsius über dem vorindustriellen Niveau zu halten und Anstrengungen zu unternehmen, den Temperaturanstieg noch weiter auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen. Dies würde bedeuten, dass radikale Reduktionen von CO₂-Emissionen in allen Wirtschaftssektoren erreicht werden müssen. Ziel ist nach dem Pariser Abkommen sogar die CO₂-Neutralität in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts.

Bauen und Wohnen ist für die negativen Auswirkungen in der Umwelt mitverantwortlich. Beim Bauen spielen zementgebundene Baustoffe eine herausragende Rolle. Wie später noch näher ausgeführt wird, beträgt der Beitrag der Produktion von Zement an den globalen CO₂-Emissionen derzeit über 8% [9]. Mit der Nutzung von Gebäuden sind derzeit 30% des globalen Endenergieverbrauchs und ca. 20% der globalen Treibhausgasemissionen verbunden. Der Bausektor ist zudem für 40% des globalen Ressourcenverbrauchs verantwortlich und somit sehr ressourcenintensiv.

Die Anforderungen für nachhaltiges Bauen und Wohnen werden zukünftig deutlich steigen. Deutschland hat zum Beispiel mit der aktuellen EnEV 2014 / EnEV 2016 die europäische Gebäuderichtlinie nur teilweise umgesetzt [10]. Diese EU-Richtlinie fordert, dass die Mitgliedsstaaten ab 2021 nur noch Niedrigstenergie-Neubauten genehmigen, deren Definition national aber noch nicht näher bestimmt ist.



Foto: Pixabay CC/PublicDomain

Am 14. November 2016 wurde vom Bundeskabinett zudem der Klimaschutzplan 2050 verabschiedet [11]. Danach muss der Bestand an Gebäuden bis 2050 nahezu klimaneutral saniert sein.

Auch das Thema Ressourceneffizienz hat erheblich an umwelt- und wirtschaftspolitischer Bedeutung gewonnen – so hat die Kommission im September 2011 einen „Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa“ veröffentlicht [12]. Für den Bausektor verlangt die EU deutliche Verbesserungen beim Ressourcen- und Energieverbrauch während der Lebensdauer von Gebäuden und Infrastruktur – mit nachhaltigen Werkstoffen, mehr Abfallrecycling und besserem Design.

Die Herausforderung besteht unter anderem darin, Baustoffe zu entwickeln, bei deren Herstellung deutlich weniger CO₂-Emissionen freigesetzt werden und bei deren Verwendung Gebäude deutlich energieeffizienter werden. Was letztere Eigenschaft betrifft, so stehen aktuell Materialien als passive Bauelemente wie Wärmedämmverbundsysteme im Vordergrund, die auf additive, nachgeschaltete Baustofftechnologien beruhen. Für innovative und nachhaltige Gebäude- und Konstruktionstechniken wäre die Entwicklung neuartiger homogener Baustoffe wünschenswert, die sich durch eine deutlich gesteigerte Wärmedämmung bei höheren Festigkeiten und besserer Recyclingfähigkeit auszeichnen. Auf Ansätze solcher Entwicklungen kann in diesem Beitrag nicht eingegangen werden, da dies den Rahmen sprengen würde. Im Folgenden liegt der Fokus auf klimaschonende Bindemittel.

3 Warum neue Bindemittelsysteme?

Moderne Gebäude bestehen im Kern aus Beton, das weltweit in größter Menge hergestelltes Material. Mit schätzungsweise 28 Mrd. t/a wird nur Trinkwasser in größerer Menge benötigt. Heute wird für Beton neben Sand, Kies und Wasser als Bindemittel Zement benötigt, der auf Zementklinker basiert. Zementklinker ist in seiner Herstellung sehr energieintensiv – etwa 3% des weltweiten Primärenergiebedarfs werden dafür benötigt. Etwa ein Drittel der Rohstoffe besteht aus chemisch gebundenem CO₂, das beim Brennen freigesetzt wird. Weitere hohe

CO₂-Emissionen entstehen aus den eingesetzten Brennstoffen. Trotz der hohen CO₂-Emission der Zementherstellung ist der spezifische CO₂-Fußabdruck einer Tonne Beton erstaunlich niedrig – da sie im Mittel nur etwa 150 kg Zement enthält.

Der immense globale Bedarf an Beton führt allerdings heute zu einem extrem steigenden Zementverbrauch mit einem entsprechenden CO₂-Ausstoß. Nach Schätzungen stammten derzeit über 8% der weltweiten CO₂-Emissionen aus der Zementherstellung. Diese Entwicklung ist langfristig nicht akzeptabel und verlangt neue Ansätze.

Klimaschutz und Kostendruck haben in den letzten Jahren dazu geführt, dass das Herstellungsverfahren von konventionellem Zement erheblich optimiert wurde, etwa durch ingenieurtechnische Verbesserungen, die zur Senkung des Energiebedarfs und damit zu geringeren CO₂-Emissionen führten, den verstärkten Einsatz von inerten, puzzolanischen und latent-hydraulischen Klinkerersatzstoffen oder die vorwiegende Nutzung sekundärer Brennstoffe mit z. T. hohen biogenen Anteilen statt fossilen Energieträgern wie Kohle, Öl und Gas. Allerdings sind die Potentiale zur CO₂-Reduktion bereits weitgehend ausgeschöpft [13, 14]. Wie in Achternbosch et al. [14] aufgezeigt, wird es der globalen Zementindustrie trotz Ausschöpfung aller dieser zur Verfügung stehenden Möglichkeiten nicht gelingen, die zukünftigen CO₂-Emissionen auf dem Niveau von 2005 zu halten.

Weitgehend einig sind sich viele Stakeholder, dass Handlungsbedarf besteht – obwohl sehr unterschiedliche Lösungsansätze favorisiert werden. Unter denjenigen, die das Klinker-Paradigma beibehalten wollen, scheint CCS eine essentielle Lösung zu sein. Der Vertrauensvorsprung, den CCS hierbei bekommt, muss erst einmal erworben werden, zu groß sind die Herausforderungen hinsichtlich bisher unbekannter technischer und wirtschaftlicher Realisierungsbedingungen, ganz zu schweigen von mangelnder gesellschaftlicher Akzeptanz.

Viele Wissenschaftler sind der Meinung, dass wesentliche Schritte zur Reduzierung der Emissionen nur möglich sind, wenn Fortschritte bei der Entwicklung neuer Bindemittelkonzepte erzielt werden. Einige favorisieren Fortschritte bekannter Konzepte, die von radikal neuen unterschieden werden müssen. Prominente Beispiele des ersteren sind Geopolymere, Belit-Calciumaluminatzemente und Zemente unter Verwendung von calcinierten Tonen [15, 16]. Den Stand der Forschung zu diesen Zementen wird in den Beiträgen von Herrn Ludwig und Herrn Thiel behandelt.

In der letzten Dekade war die Zementbranche zudem mit radikaleren Entwicklungen konfrontiert, die von außerhalb der traditionellen Zementbranche kamen und auf völlig anderen Bindemittelkonzepten

und Technologieansätzen beruhten. Diese Konzepte haben sowohl in der Industrie als auch in der Politik bemerkenswerte Aufmerksamkeit erregt. Prominente Beispiele sind Magnesia-basierte Systeme (Novacem), Calciumcarbonat-basierte Systeme (Calera, Solidia) und *h*-C-S-H-basierte Systeme (Celite) [17, 18, 19, 20].

Alle diese Entwicklungen wurden als ein Durchbruch und mögliche Lösung für das CO₂-Problem der Zementproduktion bezeichnet. Sie zogen Investoren an und Startup-Unternehmen wurden gegründet.

Neben der Suche nach neuartigen mineralischen Bindemittelsystemen, die für Betone eingesetzt werden können, gibt es auch Bestrebungen, Betone mit deutlich geringerem Gehalt an Portlandzementklinker zu entwickeln, um damit die spezifischen CO₂-Emissionen für Beton zu senken [21]. Hier wird speziell an der Rezeptur der Betone gearbeitet.

An der Entwicklung alternativer Zemente wird z. T. seit Jahrzehnten gearbeitet. Bisher wurde keiner der alternativen Ansätze zur Marktreife gebracht. Von verschiedenen Seiten werden an die Wissenschaft Anfragen gestellt, wie sie das Potential alternativer Zemente als Ersatz für den traditionellen Portlandzement (OPC) einschätzt. Hier kann die Technikfolgenabschätzung einen Beitrag zur Beantwortung dieser Fragen leisten.

4 Methodologie der Technikfolgenabschätzung

Die Machbarkeit einer Technologie schon zu Beginn ihrer Entwicklung abzuschätzen, stellt für die Systemanalyse eine große Herausforderung dar. Die Verwendung üblicher Bewertungsmethoden wird dadurch erschwert, dass kein Zugriff auf internes Wissen und Know-How besteht. Einzelheiten zu der Invention werden von den Erfindern und Technologieentwicklern oft aus Konkurrenzgründen nicht bekannt gegeben. Selten wird in wissenschaftlichen Arbeiten oder auf Konferenzen fundiertes Wissen zur Verfügung gestellt. In den meisten Fällen müssen Informationen aus verschiedenen Quellen wie Zeitungsartikeln, Zeitschriften, Pressemitteilungen oder Interviews gesammelt und analysiert werden. Solche Informationen sind oft ungenau oder nicht konsistent. Daher ist es schwierig, ein kohärentes Bild auf der Grundlage dieser verschiedenen Quellen aufzubauen.

Daneben besteht aufgrund des frühen Entwicklungsstandes oft bei den Entwicklern selbst eine hohe Unsicherheit bezüglich des aussichtsreichsten Weges zur technologischen Realisierung. In vielen Fällen befindet sich die Entwicklung noch im Labormaßstab, bestenfalls besteht schon eine kleine Pilotanlage, und man steht vor der Herausforderung, den

Ansatz auf eine technische oder gar industrielle Größe zu skalieren. Darüber führen erste Schritte zur Kommerzialisierung häufig zu neuem Wissen und Erkenntnissen auf Laborebene, die bisher getroffene Prozessführungen in Frage stellen können oder gar zu Unsicherheiten über den weiteren Weg führen können.

Zu Beginn der 70er Jahre entwickelte die Technikfolgenabschätzung (TA) Methoden, um mit solchen Kenntnislücken und Unsicherheiten umzugehen, die mit neuen Technologien verbunden sind [22]. TA zielte ursprünglich darauf ab, politische Entscheidungsträger über Chancen, Risiken und die unbeabsichtigten Auswirkungen im Zusammenhang mit neuen Technologien zu informieren und ein wissenschaftlich fundiertes Basiswissen für den politischen Entscheidungsprozess zu liefern. Neben der klassischen Politikberatung existieren aber auch TA-Varianten, die näher an der Technologieentwicklung dran sind. Bei einem solchen „early engagement“ der Systemanalytiker [23] müssen die prospektiven Bewertungsmethoden auf den Ebenen Planung, Labor oder Pilotanlage den Rahmenbedingungen angepasst werden und die Unabhängigkeit der Bewertung gewährleistet sein.

Ziel einer begleitenden TA ist es primär, die technischen Realisierungsbedingungen, das wirtschaftliche Potenzial, sowie die Chancen und Risiken der neuen Technologie so früh wie möglich abzuschätzen. Während solche Arbeiten häufig mit dem Ansatz der Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Analysis, LCA) in Verbindung stehen, folgt die begleitende TA einem anderen Ansatz. Da LCA-Tools auf standardisierte Datensätzen zurückgreifen, ist LCA oft nicht für solche Fälle geeignet, in denen sich Technologieentwicklungen noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium befinden. Die TA erarbeitet die Basisdaten für einen technisch realisierbaren Weg stattdessen selbst und zwar mit der hierfür angemessenen Genauigkeit.

Für die Bewertung neuartiger Zemente besteht eine praktikable Vorgehensweise darin, zuerst eine Materialflussanalyse durchzuführen, die alle relevanten chemischen oder stofflichen Umwandlungen identifiziert, um eine kohärente Bilanz von den Rohmaterialien bis zum zementären Bindemittel aufbauen zu können. Lücken müssen durch Plausibilitätsbetrachtungen und Schätzungen geschlossen werden. Ziel ist es, eine Prozesskette zu generieren, indem alle relevanten Prozessoperationen unter Berücksichtigung des Stoffumsatzes (bezogen auf die Produktionskapazität) der Anlage identifiziert werden.

Geeignete Systemkomponenten und zusätzliche alternative Lösungen werden bewertet und weiter spezifiziert, mit besonderem Augenmerk auf energieeffiziente und wirtschaftlich sinnvolle Lösungen.

Dadurch kann ein plausibles Modell für eine technische Realisierung erstellt werden. Dies alles wird auf iterative Weise durchgeführt, um eine Rückkopplung und fortlaufende Interaktion mit den Entwicklern zu ermöglichen und um die Technologie in einem frühen Stadium des Entwicklungsprozesses optimieren zu können. Die für die Modellierung verwendeten Energiebilanzen beruhen auf thermodynamischen und chemischen Methoden, einschließlich realistischer Abschätzungen des jeweiligen Wirkungsgrades. Darüber hinaus müssen geochemische, chemische und mineralogische Aspekte für die Analyse der Ressourcennutzung und -verfügbarkeit berücksichtigt und verfügbare Technologien für die Gewinnung der Materialien entlang der Versorgungskette untersucht werden. Die Abschätzung der Herstellungskosten beruht weitgehend auf Kostenstellenanalysen.

Neben dem Ziel, die technologische und ökonomische Machbarkeit darzustellen, können im Rahmen einer TA auch die Innovationsbedingungen für die Invention näher untersucht werden. Die Invention ist in eine bestehende „Landschaft“ einzubetten und somit ist die Struktur der Branche mit zu berücksichtigen. Hierzu wird das Transition Information System (TIS) angewendet [24]. Dieser Ansatz ermöglicht zunächst eine strukturelle Perspektive auf das Zusammenspiel von Netzwerken, Akteuren und Institutionen, die das Innovationsfeld charakterisieren [23]. Neben der Struktur stellt sich die Frage, warum und wie sich diese Struktur verändert. Ziel ist es, die Barrieren aufzuzeigen, die die Innovationsprozesse in einem im Falle des Bauwesens ausgereiften Innovationssystem bestimmen.

5 Technikfolgenabschätzungen ausgewählter Entwicklungen neuer Zemente

Im Folgenden wird die Komplexität, die mit der Entwicklung neuartiger Zemente verbunden ist, an zwei konkreten Beispielen demonstriert. Die beiden Inventionen Novacem und Celitement gehen zementchemisch komplett andere Wege. Bei der Novacem-Technologie handelt es sich um einen innovativen Magnesiabinder. Im Falle von Celitement um eine neue Familie von Calciumhydrosilikaten mit niedrigem Calciumgehalt. Vom Innovationsforschungsansatz zeigen beide Entwicklungen gewisse Gemeinsamkeiten: Beide Ansätze kommen von außerhalb der Zement-Community, beide sind mit dem Ziel angetreten, ein marktfähiges zementäres Bindemittel zu entwickeln, das Portlandzement ersetzen kann. Beide haben durch Auszeichnungen Erwartungen in der Politik und in der Zementindustrie hinsichtlich der Umsetzbarkeit dieser Erfindungen erzeugt. Beide konnten Investoren anziehen.

Obwohl Fragestellungen wie die Einschätzung der Leistungsfähigkeit des Binderprinzips natürlich in den Untersuchungen auch eine Rolle spielten, konzentrierten sich die TA-Arbeiten auf die Aspekte technische Realisierungsbedingungen, Energie- und CO₂-Bilanzen, Verfügbarkeit der Rohstoffe und spezifische Innovationsbedingungen.

Während Novacem aus der Distanz begutachtet werden musste, bestand im Falle von Celitement die Möglichkeit und Chance, die Technologieentwicklung von Anfang begleitend zu betrachten.

5.1 Novacem

Bislang besetzen Magnesiabinder, deren Erhärtung auf Säure-Base Reaktionen und auf Carbonatisierung beruhen, nur Nischenbereiche im Markt [17]. Die Novacem®-Technologie versucht einen völlig neuen Weg einzuschlagen: Technologisch basiert das Verfahren auf der mineralischen Sequestrierung, einem Ansatz der künstlichen Verwitterung vorwiegend magnesiumsilikathaltiger Gesteine. Dabei fällt amorphe Kieselsäure als Nebenprodukt an, der als reaktiver Zementbestandteil eine große Bedeutung zukommt. Das Aushärten erfolgt durch Hydratation. Ausgehärtete Novacem® Zemente bestehen aus einem Gemisch aus (nicht umgesetztem) Brucit und Magnesiumsilikathydraten (M-S-H). Der Übergang von der Carbonatisierung hin zur Hydratation ermöglicht gegenüber herkömmlichen Systemen prinzipiell eine Ausweitung des möglichen Anwendungsspektrums für dieses neue Bindemittel [18].

Viele dieser Informationen waren zunächst nicht bekannt, da Novacem aus Gründen des Schutzes vor Nachahmern nur wenige Informationen zum Prinzip des Bindemittels und zum Herstellungsverfahren dieses Zements veröffentlichte. Die Informationen gaben zudem kein konsistentes Bild und waren zum Teil widersprüchlich.

Novacem stellte verschiedene Zementformulierungen vor, deren Zusammensetzungen nicht im Detail offen gelegt wurden. Wir modellierten u.a. einen (M-S-H)-Zement, der auf die Masse bezogen zu 40 % aus MgO, 10 % aus (Hydro)-Magnesit und zu 50 % aus in situ-gebildetem reaktiven SiO₂ besteht. Um die wesentlichen Verfahrensabläufe für die Herstellung dieser Zemente herzuleiten, wurden zunächst die gut dokumentierten Forschungsergebnisse aus der mineralischen Sequestrierung, die jahrzehntelang weltweit in verschiedenen Institutionen erarbeitet wurden, ausgewertet. Es wurde schnell klar, dass Novacem vor großen technologischen Herausforderungen stand und nach unserer Kenntnis für diese mineralischen Sequestrierung bis dato keine großtechnische Realisierung existierte. Mit der in Kapitel 4 vorgestellten Vorgehensweise gelang es eine kohärente Prozesskette mit einer jährlichen Produktionskapazität an (MSH)-Zement von 15.000 Tonnen zu erstellen, die dazugehörige Anlage zu modellieren und zu bilanzieren.

Die ersten Schritte der Prozesskette (siehe Abbildung 2) beginnen mit dem Abbau und der Anreicherung von Magnesiumsilikaten.

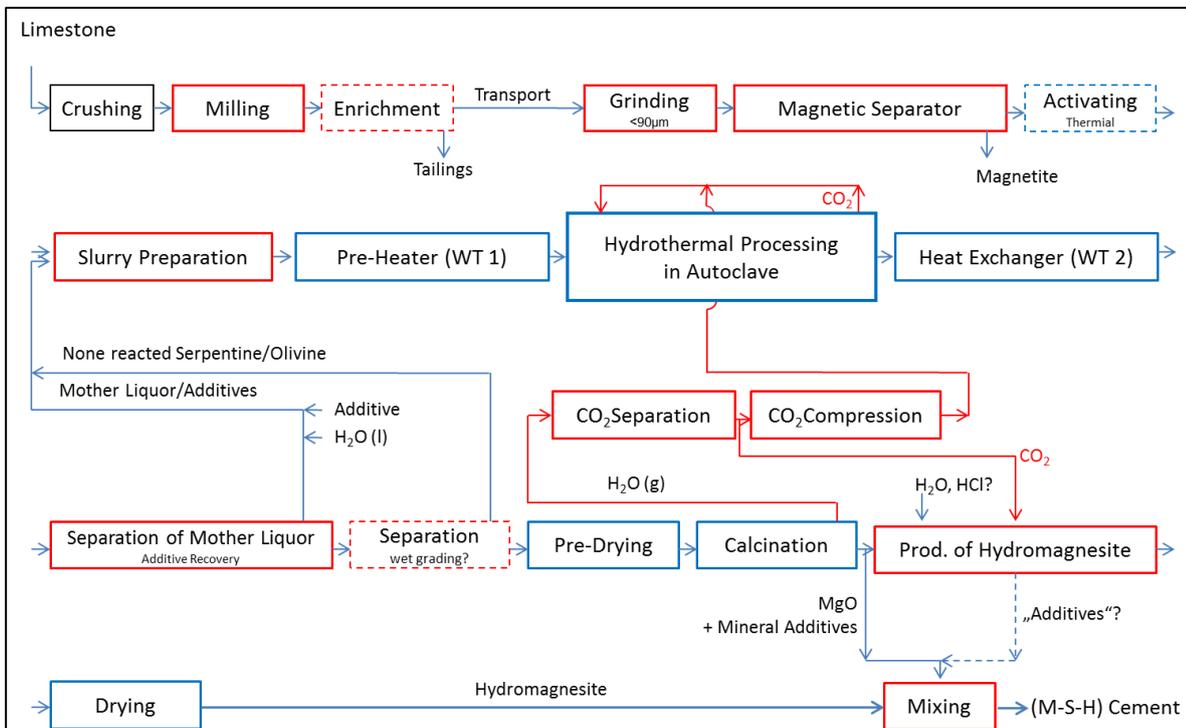


Abb. 2: Modellierter Prozessablauf für die Herstellung von MSH-Zement.

Nur feingemahlene thermisch aktivierte Materialien können carbonisiert werden. Hierzu wird eine wässrige Aufschlämmung des Pulvers mit CO₂ bei einem Druck von 150 bar und einer Temperatur von 180°C hydrothermal behandelt. Die Autoklavenprodukte (Hydromagnesit und amorphes SiO₂) werden abgetrennt, getrocknet und der überwiegende Teil hiervon bei Temperaturen von etwa 700°C kalziniert. Ein Teilstrom bleibt unbehandelt. CO₂ soll in der Technologie so weit wie möglich im Kreise geführt werden. Daher berücksichtigt die Prozesskette auch eine fraktionierte Trennung und Kompression von CO₂. Abschließend wird das Bindemittel gemischt.

Schon ein kurzer Blick auf die Prozesskette zeigt, dass die gesamte Technologie sehr komplex ist, komplexer auf jeden Fall als von den Erfindern angegeben. Dies wird auch durch die errechneten Energie- und CO₂-Bilanzen bestätigt, die einen relativ hohen thermischen und elektrischen Energiebedarf aufweisen (siehe Tabelle 1). Nach unseren Abschätzungen kann der Primärenergiebedarf für die Herstellung von M-S-H-Zementen unter realisierbaren Bedingungen doppelt so hoch liegen, wie der für die Produktion von OPC.

Die Netto-CO₂-Bilanz zeigt zwar, dass relativ niedrige CO₂-Emissionen erreicht werden können; das Ziel, "carbon negative" Zemente zu produzieren, lässt sich jedoch kaum realisieren.

Tab. 1: Energiebedarf und CO₂-Emissionen im Modell der Herstellung von 1 Tonne (M-S-H)-Zement

Prozess	[MJ]	[kWh]	[kg CO ₂]
Vorbereitung		23	13,8
Transport		3	1,8
Therm. Energie	3900-5200		193-259
Elektr. Energie		45-287	29-173
CO ₂ -Absorption			-36
Net. CO ₂ -Bilanz			201-411

Die TA weist darauf hin, dass die Realisierungsbedingungen für die Technologie sich nicht verbessern, wenn im Kontext der mineralischen Sequestrierung statt einem zu deponierenden Produkt ein Produkt mit Wertschöpfung erzeugt werden soll. Dies wird noch dadurch erschwert, dass wenig Erfahrung zur Leistungsfähigkeit von (M-S-H)-Zementen vorliegen. Viele in der Natur vorkommende Magnesiumsilikathydrate haben zudem geringe Festigkeitswerte.

Novacem ging im Jahr 2012 insolvent. Die Rechte wurden von Calix erworben. Grundsätzlich wird die Forschung an Bindemittel auf Magnesiumbasis fortgesetzt, wie entsprechende Beiträge auf der 14. ICCS 2015 in Peking zeigen.

Rückblickend drängen sich aus der Sicht der TA einige Aspekte auf, die mit dazu geführt haben

mögen, dass das Entwicklungsvorhaben scheiterte: Die technologischen Herausforderungen waren von Anfang an als außerordentlich groß einzuschätzen und damit risikobehaftet. Trotz dieser ungelösten Probleme bei der mineralischen Sequestrierung ging Novacem schon früh mit der Ankündigung „der Lösung“ medienintensiv an die Öffentlichkeit. Das Projektmanagement war unserer Meinung nach sicher nicht optimal und hat Strukturmerkmale der Zement-„Landschaft“ zu wenig berücksichtigt. Dass sich die Entwicklung von Novacem zeitlich mit der Wirtschafts- und Finanzkrise überschneidet, hat die Suche nach einem Investor, der bereit war, mit längerem Atem die Entwicklung zu fördern, sicher auch ungünstig beeinflusst.

5.2 Celitement

Celitement ist eine Entwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) [25]. Das Bindemittel besteht aus Calciumhydrosilicaten (h-C-S-H), die bei der Hydratation von C₃S und C₂S als intermediäre C-S-H-Phase mit relativ kleinem C/S-Verhältnis gebildet werden und für deren Existenz es zuvor Hinweise gab. Es gelang den Erfindern diese Spezies zu stabilisieren, zu isolieren und eine Synthesestrategie für ein Bindemittel zu entwickeln. Im Jahr 2009 wurde das Start-up Unternehmen Celitement GmbH in Kooperation mit der SCHWENK-Gruppe gegründet [20]. Zwei Jahre später wurde auf dem Campus des KIT eine Pilotanlage mit einer täglichen Produktionskapazität von 100 kg aufgebaut und in Betrieb genommen. Neben Beteiligungen des KIT und von SCHWENK hat das Start-up zwischen 2009 und 2013 Mittel vom Bundesministerium für Bildung und Forschung eingeworben.



Abb. 3: Pilotanlage der Celitement GmbH. Foto: KIT

Calciumhydrosilikate können via α -C₂SH oder über die nahezu amorphe C-S-H-Phase mit idealisierter Formel Ca₅[HSi₂O₇]₂ · 8 H₂O (C_{1,25}-S-H) hergestellt werden. Die Syntheserouten verwenden derzeit Kalkhydrat und Quarzsand als Ausgangsverbindungen. Die hier vorgestellten Ergebnisse der TA beziehen sich auf die Syntheseroute über C_{1,25}-S-H. Diese Phase bildet sich hydrothermal aus Ca(OH)₂ und

feingemahlenem SiO₂ in 6 Stunden bei 190 °C in einem Autoklaven. Starke Wasserstoffbrücken in der Struktur führen jedoch dazu, dass diese Spezies keine hydraulische Reaktivität aufweist. Eine strukturelle Störung ist notwendig, um C_{1,25}-S-H in einen reaktiven Zustand zu überführen. Ein vielversprechender Weg hierzu erscheint eine tribomechanische Aktivierung (Mahlung). Die reaktive Produktfamilie hat die idealisierte Formel C_{1,25}[HSiO₄]_y[H₂Si₂O₇]_z mit C/S = 0,75-2,75 [20].

Im Rahmen einer TA können zunächst angenommene Lösungen für eine technische Realisierung von denen abweichen, die für die Konstruktion einer realen Pilot- oder Referenzanlage verwendet werden. Dieses Vorgehen ermöglicht die Bewertung alternativer Lösungen für grundlegende Prozessschritte. In der Celitement-Technologie betrifft es beispielsweise die Frage, wie die Beheizung des Autoklaven realisiert oder wie anfallende Restenergie genutzt werden kann. Die vorgestellten Bilanzen

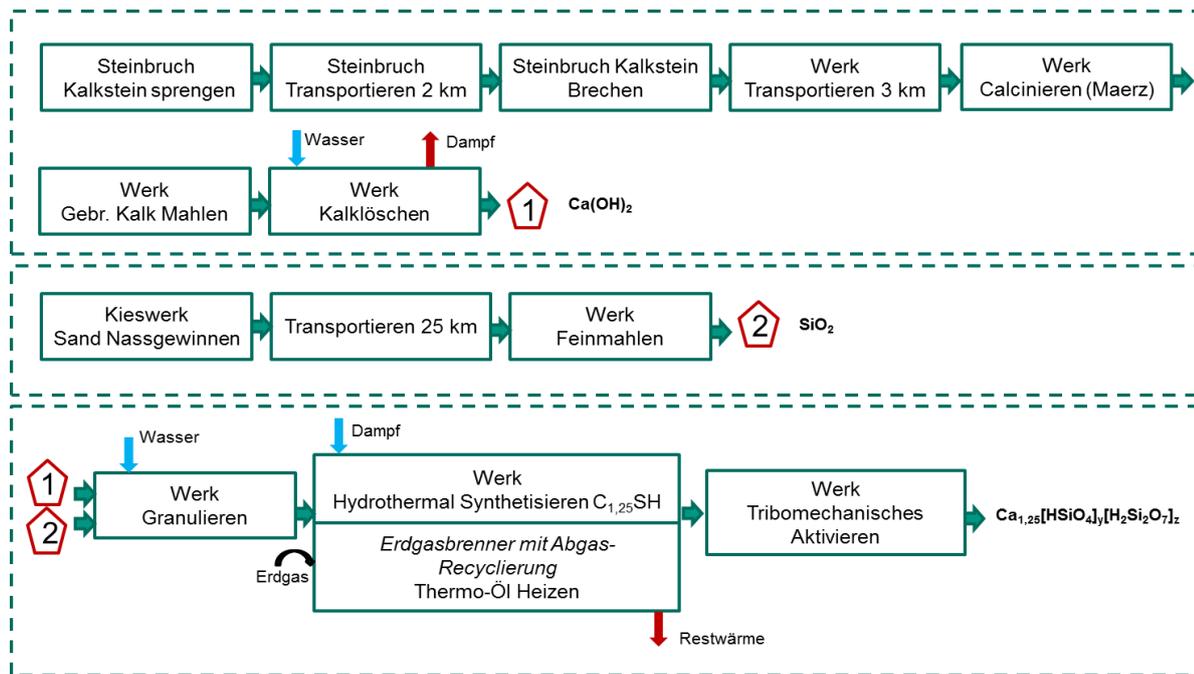


Abb. 4: Modellierter Prozessablauf für die Herstellung von Celitement.

Um die Machbarkeit der Technologie zu untersuchen, wurden Abschätzungen durchgeführt, die wie schon beschrieben auf Prozesskettenanalysen und modellhaften Anlagenauslegungen beruhen. Die jährliche Produktionskapazität der Modellanlage betrug 15.000 Tonnen. Anhand der zur Verfügung gestellten Betriebsparameter und Daten der Pilotanlage konnte eine kohärente Prozesskette (Abbildung 4) erstellt werden.

Aufgrund der relativ geringen Produktionskapazität der Modellanlage lag es nah, diese am Standort eines Zement- oder Kalkwerkes zu integrieren. Dies ermöglicht die gemeinsame Nutzung von Vorstufen (z. B. Steinbruch, Brechen und Zerkleinern von Kalkstein) und Infrastruktur (z. B. Kalksteintransport), natürlich unter Berücksichtigung entsprechender Allokationen bei der Bilanzierung. Für die Erzeugung von gebranntem Kalk nahmen wir moderne Calciniertechnologie (z. B. Maerz-Ofen) an. Für die folgenden Prozessstufen Kalklöschchen, Granulieren des angelieferten Quarzsandes mit Kalkhydrat und Wasser und dem Autoklavieren mit Dampf verwendeten wir in der Industrie etablierte Verfahren und Technologien.

erheben somit nicht den Anspruch der Darstellung eines Endergebnisses.

Eine Analyse der Prozesskette zeigt, dass die Celitement-Technologie technisch machbar ist. Zwar stellt die Skalierung der tribomechanischen Aktivierung auf industrielle Maßstäbe eine Herausforderung dar, dies erscheint aber realisierbar. Alle anderen Prozessschritte sind industriell etablierte Verfahrensstufen. Die verwendeten Ressourcen sind mit denen für konventionellen Zement identisch. Damit kann auf bestehende Vorstufen zurückgegriffen werden. Ein großer Vorteil ist, dass das ausgehärtete Bindemittel aus (C-S-H)-Gelen besteht, zu denen im Vergleich zu anderen Bindemittelkonzepten relativ viel Erfahrung vorliegt.

Tab. 2: Energiebedarf und CO₂-Emissionen im Modell der Herstellung von 1 Tonne Celitement

Prozessgruppe*	[MJ]	[kWh _{el}]	[kg CO ₂]
Kalkhydrat	1200	10	440
Quarzsand	20	30	19
Celitement	580-980	100-150	90-140

* Zusammengefasste Prozessgruppen entsprechen den in Abbildung 4 aufgeführten Prozessschritten.

Der thermische Energiebedarf beträgt schätzungsweise 60% des für Herstellung von OPC benötigten Energiebedarfs. Der elektrische Energiebedarf ist relativ hoch – in unserer Bilanzierung verursachen die Mühlen ca. 90% des Stromverbrauchs. Im Rahmen der technischen Optimierung der Aktivierung muss es ein Ziel sein, diesen zu senken.

Die gesamten CO₂-Emissionen bei der Herstellung sind deutlich niedriger als die von OPC und dies ohne Berücksichtigung alternativer Energieträger und nachwachsender Rohstoffe mit formalen "Null"-Emissionen.

Die Abschätzungen der Herstellungskosten zeigen, dass diese im Bereich von Weißzementen liegen werden.

Derzeit ist eine großtechnische Anlage mit einer jährlichen Produktionskapazität von 50.000 Tonnen in Planung. Der Markteintritt soll mit Spezialbaustoffe erfolgen. Für den Start einer Referenzanlage wurde 2020 genannt.

6 Warum es so schwierig ist, ein neuartiges Bindemittel zu entwickeln, das OPC ersetzen kann

Im Kapitel 5 wurde an konkreten Beispielen radikaler Zement-Entwicklungen demonstriert, welchen Beitrag eine Technikfolgenabschätzung zu deren Bewertung leisten kann. Es ging um die Abschätzung der Realisierungsbedingungen der mit dem Bindemittel verbundenen Technologie und um die Einschätzung des CO₂-Einsparpotentials bei einer Produktion unter realistischen Bedingungen. Die TA zieht dabei auch die Rahmenbedingungen in Betracht, die Einfluss auf die Technologieentwicklung haben. Hierbei geht es um die Struktur der „Landschaft“, in der die neue Technologie eingebettet werden soll und um die Innovationsbedingungen.

In diesem Kontext drängt sich die Frage auf, warum es so schwierig ist, alternative Zemente bis zur Marktreife zu entwickeln, obwohl, wie schon erwähnt, an der Entwicklung derartiger Zemente schon seit Jahrzehnten gearbeitet wird. Trotz unterschiedlicher Ansätze ist bisher keine der Inventionen vollständig entwickelt und tauglich für den Massenmarkt – und wahrscheinlich werden viele von ihnen es niemals sein.

Dies liegt im Wesentlichen an den enormen Anforderungen, die an ein für den Massenmarkt taugliches Produkt gestellt werden. Das bestehende Innovationssystem ist über 150 Jahre gereift, und hat sich in all seinen Segmenten verzahnt. Das gilt für den Produktionsprozess, aufeinander abgestimmte Systembaustoffe und die ineinander greifenden Prüf-, Zulassungs- und Normungsanforderungen und -prozeduren. Etwas überspitzt ausgedrückt wäre in diesem Rahmen das ideale Bindemittel der

Zukunft ein Zement, der die gleichen Charakteristika wie OPC aufweist, nur eben ungleich klimafreundlicher in seiner Herstellung und ressourceneffizienter ist.

Dies führt zu einer Liste von Anforderungen, wie solchen, dass das ideale, dem OPC mindestens ebenbürtige Produkt aus weltweit verfügbaren Rohstoffen hergestellt und möglichst auf einfache Weise wieder recycled werden kann. Es sollte nach etablierten Produktionsverfahren hergestellt und mit den gleichen Maschinen verarbeitet werden können wie konventioneller Zement. Schließlich muss das Produkt zu bestehenden Anwendungsvorschriften, Prüfzertifikaten, gesetzlichen und normativen Regelwerken kompatibel sein. Alle diese Eigenschaften müssen zu einem Preis umgesetzt werden können, der ohne Subvention wettbewerbsfähig ist.

Diese meist gar nicht explizit ausgesprochene „Forderungsliste“ stellt Entwickler und Unternehmen vor immense Herausforderungen. Hier greifen viele Einflussfaktoren ineinander, deren komplexes Zusammenspiel insbesondere von Akteuren außerhalb der Zement-Community, aber auch der Politik, unterschätzt wird. All dies ist charakteristisch für die spezifischen Rahmenbedingungen des Innovationsystems Zement, die, wie oben schon angedeutet, von einer Technikfolgenabschätzung nicht ausgeblendet werden können.

6.1 Strukturelle Faktoren

Gebäude und Strukturen haben Nutzungsdauern von 50-100 Jahren und mehr. Die Minimierung von Risiken und damit Sicherheitsdenken führen zu einer konservativen Haltung in Bezug auf Regeln und Normen. Die langfristige Zuverlässigkeit eines Materials soll noch vor dessen Einsatz nachgewiesen werden können. Wichtige Kriterien für die Beurteilung von Zementensystemen, wie Festigkeit und Dauerhaftigkeit werden durch makroskopische Tests bestimmt. Die Ableitung von allgemein anwendbaren *Mix-Design-Prozeduren* ist nur mit großen Sicherheitsreserven möglich. Darüber hinaus müssen umfangreiche und sehr zeitaufwendige Testverfahren durchgeführt werden. Für eine Zulassung sind 10-15 Jahre derzeit der übliche Horizont. Aus diesem Sicherheitsdenken heraus versteht man, dass sich in nach 150 Jahren relativ wenig geändert hat.

6.2 Wissenskultur

Traditionell werden zementhaltige Materialien hauptsächlich empirisch und inkrementell durch trial and error optimiert, da die maßgeblichen Prozesse bei der Hydratation noch nicht vollständig verstanden sind [27]. Wenn der Ablauf der Hydratation von CEM I im Verständnis noch Fragen aufwirft, gilt dies umso mehr bei einem wesentlich komplizierteren System, wie z. B. im Falle von Komposit-Zementen mit vielen reagierenden Spezies.

Je niedriger der Klinker/Zementfaktor ist, desto ausgeklügelter muss z. T. die Rezeptur sein. An die Spezialchemie werden große Anforderungen gestellt. Die Heterogenität bestimmter Klinkerersatzstoffe wie Flugaschen und Tone erschwert es in der Praxis, wohlabgestimmte Rezepturen aufrechtzuhalten. Die damit verbundenen Unsicherheiten erschweren die industrielle Umsetzung neuartiger Zementsysteme [24, 27].

Ziel ist es somit, mit wissenschaftsbasierter Ansätzen die Prozesse der Hydratation und die Performance von Materialkombinationen insbesondere in Bezug auf Dauerhaftigkeit besser zu verstehen. Die Entwicklung und Nutzung neuer analytischer Methoden mit hoher räumlicher, chemischer und struktureller Auflösung markiert in den letzten Jahren einen methodischen Durchbruch in der Wissenschaft und Entwicklung, der in Zukunft schnellere Innovationszyklen ermöglichen wird. Zum Beispiel wurden Calciumhydrosilikate durch neue analytische Methoden identifiziert. Zusätzlich bringt die nun mögliche Modellierung der Prozesse neue Erkenntnisse. Trotzdem existiert derzeit noch immer eine große „Lücke“ zwischen „Labor“ und „Realwelt“, die die Transformation vieler Ansätze zur Marktreife erschwert [27]. Die derzeitige Forschung zeichnet sich durch die besondere Intensität der Wissensgenerierung aus, deren Folgen wahrscheinlich erst in 10 - 15 Jahren in der Praxis sichtbar werden. Das soll nicht ausschließen, dass es schon früher lokale Lösungen gibt, weil lokal eine Ressource (Ton, Asche) mit besonderer Eignung und Verarbeitbarkeit vorhanden ist, die sich hervorragend als Komponente in das bekannte System einfügt, jedoch nur so lange nutzen lässt, bis dieses Depot abgebaut ist. Dies ist dann aber keine globale Lösung.

6.3 R&D-Rahmenbedingungen

Aus dem bisher Aufgeführten folgt, dass für die Grundlagenforschung zu alternativen Bindemittelkonzepten eine Reihe ungünstiger Rahmenbedingungen bestehen [24]. Der Zugang zur Finanzierung entsprechender Forschungsprojekte ist traditionell schwierig. Die langen Zeithorizonte bei der Entwicklung und die Anforderungen an neue Bindemittel in Bezug auf die Zulassung und vorhandene Standards stellen zudem ein hohes Hindernis und Risiko insbesondere für radikalere Forschungsansätze dar. Selbst für inkrementelle Innovationen, wie der Innovationsverlauf von Kalksteinzementen in Deutschland verdeutlicht, stellte der zeitliche Abstand von fast 20 Jahren zwischen Entwicklung und Marktzugang eine Herausforderung dar.

Bei wettbewerblichen Ausschreibungen waren in der Vergangenheit die Erfolgchancen einer Finanzierung von Grundlagenforschung im Bereich

Zement relativ gering. Gilt doch in der allgemeinen Wahrnehmung die Zementtechnologie im Vergleich zu innovativen Technologien wie Biowissenschaften oder Informations- und Kommunikationstechnologien als etabliert und „langweilig“. Im Kontext einer ausgereiften „Low-Tech“-Industrie wie Zement werden inkrementelle Innovationen als Kernmerkmal angesehen. Diese Rahmenbedingungen in einem restriktiven regulativen Umfeld behindern kurzfristige Kapitalanlagestrategien, die für andere neue und aufkommende Technologien charakteristisch sind.

Es stellt sich somit die Frage nach der Forschungs- und Entwicklungsorganisation. Bei Innovationszyklen von 10-15 Jahren könnte man an strategische Kooperationen von Zementunternehmen denken, die diesbezüglich den langen Atem hätten, dem aber kartellrechtliche Bedenken entgegenstehen könnten. Aussichtsreicher erscheint der Aufbau größerer Netzwerke, in denen sich Forschungsinstitutionen abstimmen können, wie derzeit die Aktivitäten zu calcinierten Tonen zeigen. Auch die langfristige Zusammenarbeit eines nationalen Forschungsinstituts, dessen Forschung programmatisch langfristig angelegt ist, mit einem Industrieunternehmen erscheint vorteilhaft, wie dies im Falle von Celiment der Fall ist. Nicht unerwähnt soll bleiben, dass die frühe Integration der Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse in den Entwicklungsprozess wichtige Anstöße liefern kann.

7 Fazit

In diesem Beitrag wurden Methoden der Technikfolgenabschätzung vorgestellt, die zur Bewertung von Entwicklungen neuartiger Bindemitteln eingesetzt werden können. Es wird aufgezeigt, dass es mit einer TA möglich ist, schon zu einem frühen Stadium der Entwicklung einer Bindemittel-Technologie erste Antworten in Bezug auf Machbarkeit, Realisierungsbedingungen und CO₂-Einsparpotential geben zu können. An zwei konkreten Beispielen wurde dies demonstriert. Beide stellen radikale Innovationen dar, Novacem ist mit Brucite/M-S-H von der konventionellen Bindemittelcharakteristik (C-S-H-Phasen) weit entfernt, wogegen der Abstand bei Celiment mit h-C-S-H deutlich geringer ist. Die TA-Studien weisen darauf hin, dass im Falle von Novacem die technischen und ökonomischen Realisierungsbedingungen als außerordentlich schwierig angesehen werden, während die Celiment-Technologie zwar vor technischen Herausforderungen steht, die aber als lösbar angesehen werden. Trotzdem ist auch für diese Technologie anzunehmen, dass sie im bestehenden Innovationssystem 10-15 Jahre benötigt, um dem OPC als universellem Bindemittel auf dem Massenmarkt Konkurrenz zu machen zu können.

Dieser Zeithorizont gilt auch für andere angedachte Alternativen. Derzeit ist keine für den Masseneinsatz ausgeklügelte Lösung zur Marktreife entwickelt. Der Trend, den Klinker/Zement-Faktor in (Multi)-Kompositzementen weiter zu senken, stößt an Grenzen, auch deshalb, weil derzeit das Wissen über die Abläufe der Prozesse die die Hydratation und Dauerhaftigkeit bestimmen, begrenzt ist. Aus unserer Sicht befinden wir uns derzeit in einer wichtigen Phase der Wissensgenerierung. Der Einsatz moderner analytischer Methoden und die Modellierung wird das Verständnis der Prozesse auch komplexerer Phasenzusammensetzungen weiter verbessern. Noch sind die Innovationszyklen und die Prüfprozeduren davon unbeeinflusst, so dass davon auszugehen ist, dass die Folgen des neuen Wissens und damit die Markteinführung neuer Systeme erst in einiger Zeit sichtbar werden. Auch wenn es viel versprechende Entwicklungen gibt, ist aus unserer Sicht trotz der Dringlichkeit der CO₂-Problematik eine globale Alternative zu konventionellem Zement als Massenbaustoff in den nächsten 10-15 Jahren nicht zu erwarten. Dies dürfte auch die Zementindustrie so sehen.

8 Literatur

- [1] Anonym (2017) Das internationale Baugeschäft. Die Deutsche Bauindustrie. Hauptverband der deutschen Bauindustrie e. V. Berlin <https://www.bauindustrie.de/themen/internationales-bauen/das-internationale-baugeschafft/>
- [2] Anonym (2017) Entwicklung des Bauvolumens in Deutschland in den Jahren 2008 bis 2017 (in Milliarden Euro), Statista. Das Statistik Portal. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167953/umfrage/bauvolumen-in-deutschland-seit-2008/>
- [3] Verein der deutschen Zementwerke e.V (VDZ) (2017) Zahlen und Daten. E. Bruttoinlandsprodukt, Bauwirtschaft. Kompilierte Daten aus Destatis. <https://www.vdz-online.de/publikationen/zahlen-und-daten/e-bruttoinlandsprodukt-bauwirtschaft/>
- [4] Anonym (2017) Entwicklung des Bauvolumens in Deutschland in den Jahren 2008 bis 2017 (in Milliarden Euro), Statista. Das Statistik Portal. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167953/umfrage/bauvolumen-in-deutschland-seit-2008/>
- [5] Axel Zweck, Dirk Holtmannspötter, Matthias Braun, Michael Hirt, Simone Kimpeler, Philine Warnke. (2015) Gesellschaftliche Veränderungen 2030, Ergebnisband 1 zur Suchphase von BMBF-Foresight Zyklus II. VDI Technologiezentrum GmbH, Innovationsbegleitung und Innovationsberatung, Düsseldorf
- [6] Thomas Baumanns, Philipp-Stephan Freber, Kai-Stefan Schober, Florian Kirchner (2016) Roland Berger GmbH, UniCredit Bank AG. Bauwirtschaft im Wandel, Trends und Potentiale bis 2020. Roland Berger GmbH, München. www.rolandberger.com
- [7] McKinsey Global Institute (2017) Reinventing Construction, A route to higher productivity, McKinsey&Company. www.mckinsey.com/mgi
- [8] Franka Kühn (2017) Die demographische Entwicklung in Deutschland. Bundeszentrale für politische Bildung (BpB). <http://www.bpb.de/politik/innenpolitik/demografischer-wandel/196911/fertilitaet-mortalitaet-migration>
- [9] Robbie M. Andrew (2017) Global CO₂ emissions from cement production. Earth System Science Data. Discussion papers. Andrew, R. M.: Global CO₂ emissions from cement production, Earth Syst. Sci. Data Discuss., <https://doi.org/10.5194/essd-2017-77>, (Open Access).
- [10] Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden. <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:DE:PDF>
- [11] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016) Der Klimaschutzplan 2050 – Die deutsche Klimaschutzlangfriststrategie. <https://www.bmub.bund.de/themen/klimaanergie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimaschutzplan-2050/>
- [12] Europäische Kommission (2011) Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa. Brüssel, den 20.9.2011 KOM(2011) 571 endgültig
- [13] Martin Schneider, Michael Romer, Markus Tschudin, Hugo Bolio (2011) Sustainable cement production - present and future. Cem. Concr. Res., Vol. 41 (7), pp. 642-650
- [14] Matthias Achternbosch Christel Kupsch, Eberhard Nieke, Gerhard Sardemann (2011) Klimaschonende Produktion von Zement: eine Utopie? GAIA, Vol. 20, 1, pp. 31-40
- [15] Horst-Michael Ludwig, Wensheng Zhang (2015) Reseach review of cement clinker chemistry. Cement and Concrete and Research, Vol. 78, pp. 24-37

- [16] Karen L. Scrivener (2014) Options for the future of cement. *Indian Concr. J.*, Vol. 88 (7), pp. 1-21
- [17] Matthias Achternbosch Christel Kupsch, Eberhard Nieke, Gerhard Sardemann (2012) Sind magnesiabasierte Zemente die Zukunft? Teil 1: Analyse bisheriger Entwicklungen. *ZKG International*, Vol. 2, pp. 64-72
- [18] Matthias Achternbosch Christel Kupsch, Eberhard Nieke, Gerhard Sardemann (2012) Sind magnesiabasierte Zemente die Zukunft? Teil 2: Novacem - Eine Bewertung neuer Entwicklungen. *ZKG International*, Vol. 3, pp. 64-72
- [19] Matthias Achternbosch, Ulrich Dewald, Eberhard Nieke, Gerhard Sardemann (2015) Is coal fly ash a suitable alkaline resource for manufacturing new calcium carbonate-based cements? A systems analytical evaluation. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 19, 1, pp. 71-81
- [20] Matthias Achternbosch, Ulrich Dewald, Eberhard Nieke, Gerhard Sardemann (2016) New calcium hydrosilicate-based cements Celitement - a technology assessment. *ZKG International*, Vol. 6, pp. 48-57
- [21] Michael Haist, Jack S. Moffatt, Raphael Breiner, Harald S. Müller (2014) Entwicklungsprinzipien und technische Grenzen der Herstellung zementarmer Betone. *Beton- und Stahlbetonbau* Vol. 109 Heft 3, pp. 202-215
- [22] Armin Grunwald (2010) Technikfolgenabschätzung - eine Einführung. Berlin: edition sigma (Gesellschaft - Technik - Umwelt, Neue Folge 1)
- [23] Armin Grunwald, Matthias Achternbosch, (2013) Technology assessment and approaches to early engagement. In: N. Doorn, D. Schuurbiers, I. Poel, M.E. van de Gorman (Hrsg.): *Early engagement and new technologies: opening up the laboratory technology*. Dordrecht Heidelberg New York London: Springer, pp. 15-34
- [24] Ulrich Dewald, Matthias Achternbosch (2016) Why more sustainable cements failed so far? Disruptive innovations and their barriers in a basic industry. *Environmental Innovation and Societal Transition*, Vol. 19, pp. 15-30
- [25] Celitement GmbH (2018) www.celitement.com
- [26] Matthias Achternbosch, Ulrich Dewald, Eberhard Nieke, Gerhard Sardemann (2015) A comparative technology assessment of new radical low CO₂-cements - conditions of technical realizations, balances. In: *The Chinese Ceramic Society; China Building Materials Academy; State Key Laboratory of Green Building Materials (Organizer) (Hrsg.): Proceedings of the 14th International Congress on the Chemistry of Cement*, 13.-16.10.2015. Beijing, China
- [27] Karen L. Scrivener, André Noat (2011) Hydration of cementitious materials, present and future. *Cem. Concr. Res*, Vol. 41, pp. 651-665

Autor

Dr. Matthias Achternbosch

Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Karlstraße 11
76133 Karlsruhe

Calcium-Silikat-Hydrat – Unverzichtbarer Bestandteil von Beton

Michael Haist

Zusammenfassung

Calcium-Silikat-Hydrat (CSH) wird – neben anderen Stoffen – durch die Hydratation von Portlandzement mit Wasser gebildet. Auch wenn Portlandzement zunehmend durch Zementersatzstoffe (sog. Secondary Cementitious Materials, SCMs), wie Gesteinsmehle, Puzzolane und latent hydraulische Zusatzstoffe oder durch gänzlich neue Binderarten wie beispielsweise Celitement ausgetauscht wird, so basieren nahezu alle heute verfügbaren Bindemittelsysteme auf der Bildung von Calcium-Silikat-Hydrat. Um die Wirkung von Zusatzstoffen oder neuartigen Zementen auf die Betoneigenschaften zu verstehen und diese gezielt steuern zu können, ist somit ein eingehendes Verständnis der Hydratation von Portlandzement sowie der Struktur und der mechanischen Eigenschaften von CSH erforderlich. Während dabei zu den chemischen und mineralogischen Vorgängen bei der Hydratation sehr umfangreiche Studien vorliegen, ist das Wissen zum Einfluss einzelner Hydratationsprodukte auf die mechanischen Eigenschaften des gebildeten CSH-Gels noch vergleichsweise wenig untersucht. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über den gegenwärtigen Stand der Forschung in diesem Bereich.

1 Einführung

Portlandzement besteht überwiegend aus Calciumsilikatphasen, die in einem thermischen Sintervorgang aus Calciumoxid CaO und Siliziumdioxid SiO_2 gebildet werden. Die ausgeprägten Umwelteinwirkungen bei der Zementherstellung resultieren dabei im Wesentlichen aus der Bereitstellung des Calciumoxids, das durch Entsäuerung von Kalkstein (CaCO_3) unter Freisetzung von CO_2 in einem Brennvorgang gewonnen werden muss.

Die Calciumsilikate liegen im Zement in zwei unterschiedlichen Phasen vor: Tricalciumsilikat $3 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S) stellt mit ca. 60 - 70 M.-% den Hauptbestandteil von Portlandzement dar, gefolgt von der calciumärmeren Phase Dicalciumsilikat $2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S). Beide Phasen bilden bei der Reaktion mit Wasser unterschiedliche Mengen von Calcium-Silikat-Hydrat (CSH) und Calciumhydroxid (CH). Die Phase CSH bildet im erhärteten Beton die Matrix, in der die Gesteinskörner eingebettet sind und durch die Kräfte übertragen werden können.

Calcium-Silikat-Hydrat ist chemisch nicht durch ein festes Verhältnis von CaO , SiO_2 und H_2O definiert. Im frühen Stadium der Hydratation werden vielmehr CaO -reiche CSH-Phasen gebildet, während mit zunehmendem Alter das Masseverhältnis von CaO zu SiO_2 (C/S) signifikant absinkt und im Mittel einen Wert von ca. $\text{C/S} = 1,7$ erreicht. Abb. 1 zeigt diese zeitliche Entwicklung in Form der Verschiebung der Häufigkeitsverteilung des C/S -Werts für Zementstein (d. h. die Summe aus

CSH-Gel und CH). Diese Verschiebung hat zur Folge, dass ein Teil des für die Zementherstellung aufgewendeten CaO 's für die eigentliche Matrix- und damit Festigkeitsbildung nicht benötigt wird und somit aus Umweltschutzgründen eingespart werden könnte. Ein wichtiger Ansatz bei der Entwicklung neuartiger Zemente besteht somit darin, den Anteil an CaO im Zement zu reduzieren (**Ansatz 1**). Dies kann beispielsweise durch eine Verschiebung des Anteils an C_3S hin zu einem höheren Anteil an C_2S erfolgen – was i. d. R. jedoch mit gravierenden Folgen für die Hydratationsgeschwindigkeit und Festigkeitsentwicklung einhergeht und somit durch neue Entwicklungen kompensiert werden muss (siehe [1]). Alternativ wird der Ansatz verfolgt, das überschüssige, dann als Calciumhydroxid (CH) vorliegende CaO durch Sekundärreaktionen in festigkeitsbildende CSH-Phasen zu überführen und hierdurch Portlandzement einzusparen (**Ansatz 2**; siehe z. B. [2; 3]). Letzterer Ansatz wird beispielsweise durch Zugabe puzzolaner Zusatzstoffe (z. B. Flugasche, Silikastaub) oder durch neuartige calcinierte Tone umgesetzt.

Während bei Ansatz 1 die Verbesserung der Umweltwirkung also durch Reduktion des Gehalts an CaO im Portlandzement erzielt wird, muss bei Ansatz 2 Portlandzement durch Ersatzstoffe ausgetauscht werden, um dieselbe Wirkung zu erzielen.

Gleiches gilt für die Verwendung latent hydraulischer Zusatzstoffe (**Ansatz 3**). Wie Tab. 1 zeigt, verfügen diese Stoffe im Vergleich zu puzzolanen Zusatzstoffen über einen vergleichsweise hohen Gehalt an CaO , das zusammen mit dem im Zusatzstoff ebenfalls

Tab. 1 Übersicht über die chemische Zusammensetzung von Zement bzw. typischen Betonzusatzstoffen

Stoffgruppe	(Zusatz-) Stoff	Chemische Zusammensetzung						Physikalische Eigenschaften	
		SiO _{2,amorph}	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaCO ₃	SiO _{2,krist.}	Dichte	Mittlere Partikelgröße
		[M.-%]						[g/cm ³]	[µm]
Zement	Portlandzement	19 ... 23	61 ... 67	3 ... 7	1,4 ... 4			3,1	10 ... 20
Puzzolane	Flugasche	36 ... 55	1 ... 12,5	22 ... 32	5 ... 19			2,1 ... 2,5	10 ... 20
	Siilka Staub	85 ... 98	0 ... 1	0 ... 2				2,3	0,1 ... 0,2
	Kalzinierte Tone	50 ... 60	0 ... 2	20 ... 40	0 ... 5			2,6 ... 2,63	5 ... 20
Latent hydraulische Zusatzstoffe	Hüttensand	28 ... 38	35 ... 48	6 ... 17	0 ... 3			2,85	10 ... 20
	Trass	50 ... 75	3 ... 15	10 ... 25				1,8 ... 2,8	10 ... 30
Gesteinsmehle	Kalksteinmehl			0 ... 2	0 ... 2	95 ... 98		2,70	5 ... 15
	Quarzmehl						95 ... 99	2,65	1 ... 100

vorhandenen SiO₂ im alkalischen Milieu der Porenlösung gelöst wird und nun zusammen mit H₂O CaO-arme CSH-Phasen bilden kann. Sowohl den puzzolanen als auch den latent-hydraulischen Zusatzstoffen ist dabei gemein, dass ihre Verfügbarkeit zunehmend begrenzt und ihre Umweltwirkung als Abfallstoff (spätestens bei der Entsorgung) eher zweifelhaft ist (siehe [4]).

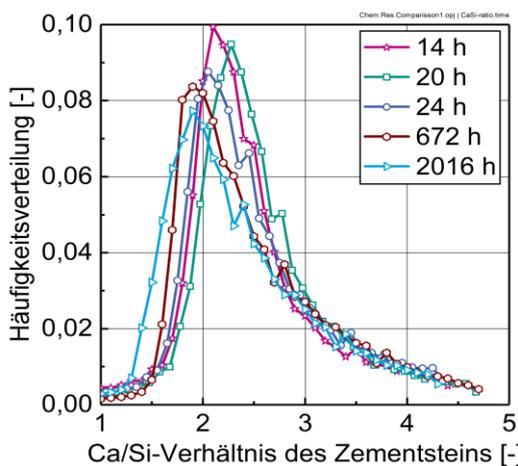


Abb. 1: Häufigkeitsverteilung des Ca/Si-Verhältnisses in Zementstein in Abhängigkeit vom Alter und damit dem Hydratationsgrad der Probe

Alternativ zum Austausch von Zement durch reaktive Zusatzstoffe haben eigene Untersuchungen gezeigt, dass die Menge an Portlandzement ohne nachteiligen Einfluss auf die Druckfestigkeit reduziert werden kann, wenn gleichzeitig die Packungsdichte der Gesteinskörnung gesteigert wird. Zielsetzung dieser Arbeiten ist es, die Leistungsfähigkeit des Bindemittels Portlandzement besser auszunutzen. Einen detaillierten Überblick über diesen Ansatz gibt [5].

Ein weiterer Ansatz zur Reduktion der Umweltwirkungen bei der Betonherstellung bietet sich durch Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit der eingesetzten Bindemittel (d. h. des Portlandzements aber auch der Zusatzstoffe), so dass idealerweise bereits

im Bemessungsalter der Erhärtungsvorgang möglichst weit fortgeschritten ist (**Ansatz 4**). Hierzu werden die Bindemittel i. d. R. extrem fein aufgemahlen um eine möglichst schnelle Hydratation zu ermöglichen. Alternativ bzw. zusätzlich kann die Bildung neuer CSH-Phasen durch Zugabe keimbildender Zusatzstoffe, die eine Präzipitation von CSH in der Porenlösung bewirken, beschleunigt werden. Hierzu haben sich insbesondere extrem fein aufgemahlene Kalksteinmehle als sehr günstig erwiesen [6].

Ein letzter, bislang nur wenig adressierter Ansatz besteht in der gezielten Manipulation der Vernetzung der CSH-Phasen durch eine beschleunigte Polymerisierung (**Ansatz 5**). Durch diese Vernetzung, die in herkömmlichen Zementstein sehr langsam abläuft und über Jahrzehnte andauert, könnte die Festigkeit des Zementsteins bei unveränderter Zusammensetzung erheblich gesteigert werden (siehe z. B. [7]).

Allen zuvor vorgestellten Entwicklungsansätzen ist gemein, dass sie signifikant in die Hydratation des Portlandzements eingreifen und die Zusammensetzung des Zementsteins und hier insbesondere die Zusammensetzung und Morphologie der Zementsteinphase CSH modifizieren. Um die Wirkungsweise als auch die Effektivität dieser Maßnahmen untersuchen zu können, wird ein detailliertes Verständnis der Mikrostruktur und Mikromechanik von reinem Portlandzementstein benötigt. Zielsetzung des hier vorliegenden Beitrags ist es, einen Überblick über die Mechanismen der Festigkeitsbildung und Verformung von CSH zu geben.

2 Einführung in die Mikrostruktur von Calcium-Silikat-Hydrat (CSH)

Calcium-Silikat-Hydrat – die maßgebliche matrixbildende Phase im Beton – besteht aus granularen Partikeln mit einer Größe von wenigen Nanometern, die durch einen Fällungsprozess aus der übersättigten Porenlösung des hydratisierenden Zementleims bzw. Zementsteins gebildet werden [8]. Abb. 2 zeigt die typische Struktur eines CSH-Nanopartikels (siehe [9]).

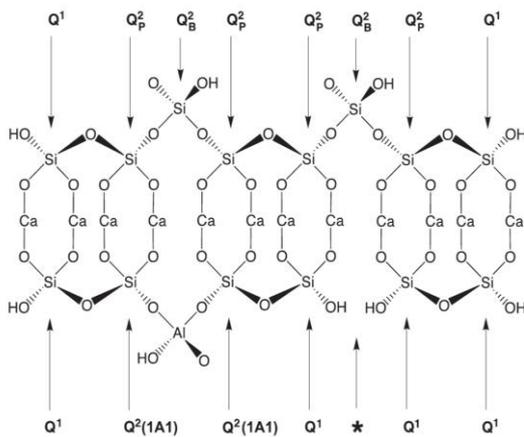


Abb. 2: Chemische Struktur eines CSH-Nanopartikels [9]

Computerchemische Untersuchungen (beispielsweise von Quomi [7]) zeigen, dass die so gebildeten Partikel eine sehr hohe, weitgehend einheitliche Steifigkeit zwischen 65 GPa und 72 GPa aufweisen. Die Steifigkeit steigt für abnehmende Ca/Si-Werte stark an. Für die mechanischen Eigenschaften der CSH-Phasen sind jedoch nicht nur die Eigenschaften der einzelnen CSH-Nanopartikel von Bedeutung, sondern auch deren physikalische Interaktionen. Die mit fortschreitender Hydratation gebildeten CSH-Nanopartikel besitzen analog zu den wesentlich größeren Zementpartikeln ein elektrochemisches Doppelschichtpotential, das bei einer starken Annäherung der Partikel zu einer Agglomeration derselben führt [10]. Untersuchungen von Tennis und Jennings zeigen, dass diese Agglomeration jedoch nicht willkürlich erfolgt, sondern dass sich vielmehr zwei Arten von Agglomerat-Strukturen bilden, die sich in der Packungsdichte der CSH-Nanopartikel unterscheiden [11; 12]. Für die Strukturen mit einer geringeren Packungsdichte wurde von Jennings der Begriff Low-Density-CSH (LD-CSH) und für die besser gepackten Strukturen der Begriff High-Density-CSH (HD-CSH) eingeführt [12]. Untersuchungen von Ulm und Kollegen zeigen, dass diese Unterschiede in der Packungsdichte sich in stark unterschiedlichen mechanischen und physikalischen Eigenschaften der CSH-Phasen widerspiegeln [13]: HD-CSH weist im Alter von 28 Tagen eine um 30 % bis 40 % höhere Festigkeit und Steifigkeit auf als das weniger dichte LD-CSH [13; 14]. Ziel der Entwicklungsarbeiten ist es daher, den Anteil der HD-CSH-Phasen gegenüber dem Anteil der LD-CSH-Phasen zu steigern.

Untersuchungen von Bentur [15] und später Skibsted [9] zeigen weiterhin, dass die im frühen Alter durch Van-der-Waals- und Doppelschicht-Wechselwirkungen geprägte Interaktion der CSH-Nanopartikel innerhalb der LD- und HD-CSH-Phasen mit

zunehmendem Alter durch eine Polymerisierung überlagert wird, was zu einer signifikanten Festigkeits- und Steifigkeitszunahme der gebildeten Strukturen führt. Unbekannt ist bislang, ob und wie dieser Vorgang gezielt beeinflusst oder gesteuert werden kann. Auch ist nicht bekannt, ob diese Polymerisierung in beiden Typen von CSH-Phasen in gleicher Weise abläuft.

3 Experimentelle Untersuchung der Strukturbildung in hydratisierendem Portlandzementstein

Die Entwicklung der mechanischen Eigenschaften von Zementstein bzw. Beton als Funktion des Hydratationsgrads des Zements ist eine zentrale Frage im Betonbau. Umfangreiche Untersuchungen wurden hierzu beispielsweise von Budelmann, Rostazy, Byfors oder de Schutter vorgelegt (siehe [16; 17; 18]). Diese Arbeiten ermöglichen heute eine ingenieurmäßige Beschreibung der zeitlichen Entwicklung ausgewählter mechanischer Eigenschaften wie z. B. der Betondruckfestigkeit oder des E-Moduls als Funktion des Hydratationsgrads.

Derartige makroskopische bzw. empirische Modelle sind jedoch nicht als Grundlage geeignet, um den Zusammenhang zwischen Mikrostrukturveränderungen – z. B. durch Zugabe von Flugasche oder calcinierten Ton – und Veränderungen der physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs vorherzusagen. Insbesondere ist eine Steuerung der Baustoffeigenschaften durch die gezielte Einstellung der Mikrostruktur bislang nicht möglich.

Nachfolgend werden die Grundlagen für eine solche Steuerung vorgestellt. Hierzu wurden sehr umfangreiche Untersuchungen zur Strukturbildung von CSH-Phasen vorgenommen und die mechanischen Eigenschaften der Phasen ermittelt.

3.1 Untersuchungsmethoden

Alle Untersuchungen wurden an Zementstein aus Portlandzement CEM I 42,5 R mit einem w/z-Wert von 0,4 durchgeführt. Der hydratisierende Zementstein wurde unter isothermen Bedingungen bei 20 °C gelagert. Der Hydratationsgrad des Zements zu jedem betrachteten Zeitpunkt wurde als Quotient der bis zu diesem Zeitpunkt freigesetzten Hydratationswärmemenge und der Gesamtwärmefreisetzung bei vollständiger Hydratation des Zements bestimmt.

Aus den hergestellten Zementleimen wurden zylindrische Probekörper hergestellt, in definiertem Alter in Scheiben gesägt und die Hydratation durch einen Lösungsmittelaustausch gestoppt (vergleiche [19]). Nachdem die Hydratation vollständig zum Erliegen gekommen war, wurden die Oberflächen vorsichtig geschliffen und manuell poliert.

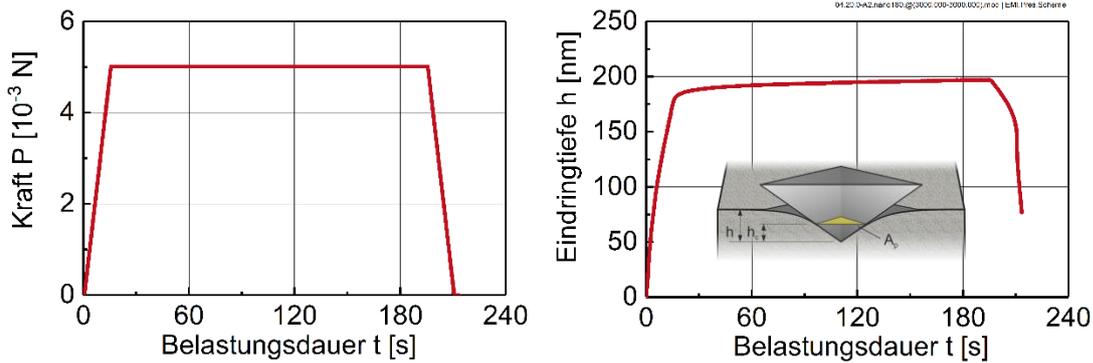


Abb. 3: Schema und zeitlicher Ablauf des Indentationsversuchs: Zeitlicher Verlauf der Belastung (links) und der Eindringtiefe des Indenters (rechts)

Die mechanischen Eigenschaften der mikroskaligen Zementsteinphasen wurden mittels Nanoindentationsuntersuchungen mit einem dreiseitigen Berkovich-Indenter aus Diamant ermittelt. Die entsprechenden Last-Zeitkurven und Last-Eindringkurven sind exemplarisch in Abb. 3 dargestellt. Die Ergebnisse der Nanoindentationstests wurden mit der Methode von Oliver und Pharr ausgewertet [20]. Diese Methode liefert den Indentationsmodul M als Maß für die Steifigkeit und die Indentationshärte H als Maß für die Festigkeit an der jeweils indentierten Stelle der Probe. Der Kriechmodul C der Proben wurde analog zu der von Vandamme vorgeschlagenen Methode ermittelt [21]. Mit steigendem Wert von C nehmen die Kriechgeschwindigkeit und damit das Kriechen selbst ab.

An jeder Probe wurden 1250 Indentationen vorgenommen, welche jeweils die drei Messgrößen H , M und C lieferten. Die mechanischen Eigenschaften variieren dabei erheblich in Abhängigkeit des Ortes auf der Probenoberfläche. Dies kann auf die räumliche Verteilung der einzelnen Zementsteinphasen, wie LD- oder HD-CSH zurückgeführt werden. Alle Untersuchungsergebnisse wurden daher mittels Häufigkeitsverteilungen und einer anschließenden finiten Mischungsmodellierung auf das Vorkommen einzelner Phasen hin untersucht (Methode siehe [22]). Die Modellierung erfolgte durch eine kombinierte Betrachtung der Parameter H , M und C . Neben den mechanischen Untersuchungen wurden weiterhin umfangreiche Mikrostrukturuntersuchungen wie beispielsweise zur Dichte, Porosität etc. durchgeführt.

3.2 Ergebnisse

Abb. 4 zeigt die Ergebnisse der Nanoindentationsuntersuchungen. Unter Verwendung des zuvor erwähnten finiten Mischungsmodells konnten im frühen Stadium der Hydratation bis zu 5 und für höhere Alter bis zu 3 verschiedene Phasen identifiziert

werden. In Abb. 4 sind nur die Kennwerte der drei Phasen mit den niedrigsten Werten dargestellt, da Phasen mit höheren Werten eindeutig dem Zementklinker zugeordnet werden konnten und somit nicht relevant für die Charakterisierung des CSH-Gels sind.

Die Zusammensetzung des Zementsteins (siehe Abb. 4d) wird den Ergebnissen zufolge von den Phasen LD- und HD-CSH dominiert, welche in Summe mehr als 75 Vol.-% der gebildeten Hydratphasen ausmachen. LD- und HD-CSH besitzen aufgrund ihres nanogranularen Aufbaus eine poröse Struktur. Das in diesen Phasen jeweils eingeschlossene Porenvolumen ist dabei in den oben angegebenen Volumenanteilen berücksichtigt. Nicht berücksichtigt in Abb. 4d ist hingegen das zwischen den LD- und HD-Phasen befindliche Kapillarporenvolumen.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Anteil an LD-CSH besonders bei höherem Hydratationsgrad zunimmt, während der Anteil an HD-CSH konstant bei einem Volumenanteil von ca. 35 Vol.-% verbleibt. Die Zunahme von LD-CSH wird von einer Abnahme des Gehalts der dritten Phase, der sog. Mischphase, begleitet. Diese Mischphase konnte durch eine ortsaufgelöste Elementanalyse als eine stark Ca-reiche Struktur identifiziert und der Phase Calciumhydroxid zugeordnet werden.

Die in Abb. 4 dargestellten Ergebnisse zeigen weiterhin, dass trotz der vergleichsweise geringen Änderungen im Volumenverhältnis von LD- zu HD-CSH, die mechanischen Eigenschaften – d. h. die Werte H , M und C – der Phasen über die Zeit stark zunehmen und gegen einen Endwert streben. Dies bedeutet, dass die beiden Hauptbestandteile (und für die Festigkeitsbildung maßgebenden Komponenten) des Zementsteins, nämlich LD- und HD-CSH keine zeitlich konstanten Eigenschaften aufweisen, sondern sich mit zunehmendem Hydratationsgrad versteifen bzw. verfestigen.

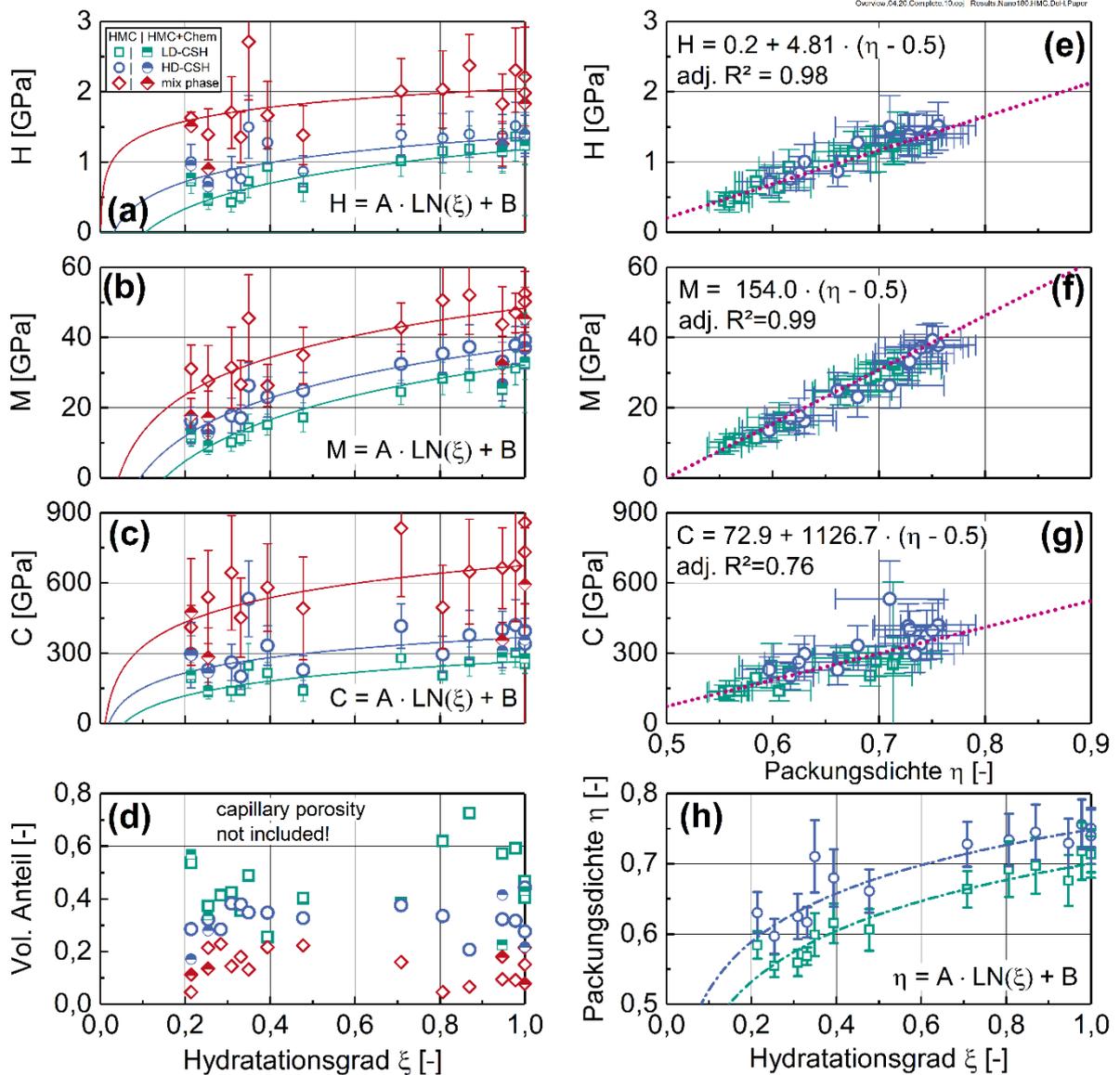


Abb. 4: Mechanische Eigenschaften H (Abb. a und e), M (Abb. b und f) und C (Abb. c und g) für die mittels Nanoindentation und finiter Mischungsmodellierung identifizierte Zementsteinphasen LD- und HD-CSH sowie einer Mischphase als Funktion des Hydratationsgrads ξ (links) bzw. der Packungsdichte η (rechts); (Abb. d) Volumenanteil und (Abb. h) Packungsdichte als Funktion des Hydratationsgrads

Um die Ursache dieser Veränderung zu identifizieren, wurde auf Grundlage der durch Nanoindentation gewonnenen Daten ein mikromechanisches Modell entwickelt, mit welchem die Packungsdichte der CSH-Nanopartikel sowohl in der LD- als auch der HD-CSH Phase ermittelt werden konnten. Die Ergebnisse dieser Modellbildung sind in Abb. 4 (rechts) dargestellt.

Wie Abb. 4 (e bis h) zeigt, stehen alle mechanischen Eigenschaften in linearem Zusammenhang zur Packungsdichte der CSH-Nanopartikel. Hierbei besteht offensichtlich kein Unterschied zwischen LD-CSH und HD-CSH, d. h. eine identische Packungsdichte der CSH-Nanopartikel führt zu identischen

mechanischen Eigenschaften der gebildeten CSH-Phasen. Aus Abb. 4 (h) wird weiterhin deutlich, dass die Definition von LD- und HD-CSH nicht anhand klar definierter, konstanter Packungsdichten erfolgen kann. Die Bildung von neuem LD-CSH-Gel geht mit einer kontinuierlichen Verdichtung der existierenden LD-CSH-Phase einher, so dass ihre Klassifizierung sich von LD- hin zu HD-CSH verschiebt. Mit zunehmendem Alter konvergieren die Packungsdichten und somit die mechanischen Eigenschaften des LD- und HD-CSH.

Neben der Veränderung der Materialeigenschaften der beiden strukturbildenden Phasen nimmt mit zunehmendem Probenalter weiterhin die durch die

Hydratation gebildete Gesamtmenge an LD- und HD-CSH-Phasen zu, was einen Rückgang der Kapillarporosität des Zementsteins zur Folge hat. Abb. 5 zeigt die mittels Si-Kernspinnuntersuchungen ermittelte zeitliche Zunahme der Gesamtmenge an LD- und HD-CSH.

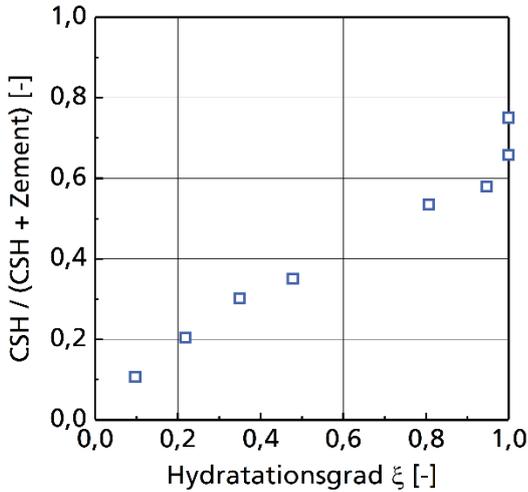


Abb. 5: Zeitliche Entwicklung des durch die Hydratation gebildeten Anteils an LD- und HD-CSH-Phasen bezogen auf die Summe aus CSH-Gel und Zement ermittelt mittels Si-NMR Untersuchungen (Details zur Methode siehe [9]).

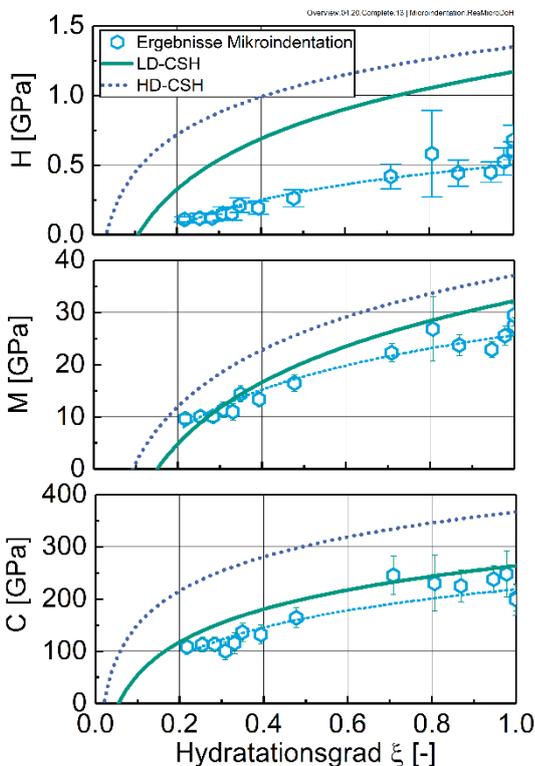


Abb. 6: Vergleich von Ergebnissen von Mikroindentationsuntersuchungen an Zementstein mit den mittels Nanoindentation ermittelten Eigenschaften von LD- und HD-CSH

Aufbauend auf dem so gewonnenen Verständnis der zeitlichen Entwicklung der Mikrostruktur sowie der mechanischen Eigenschaften der Mikrostrukturkomponenten sollen in einem nächsten Schritt die Eigenschaften des gesamten Zementsteins bzw. Betons vorhersagbar gemacht werden. Hierzu wurden sog. Mikroindentationsuntersuchungen durchgeführt, deren Versuchsablauf weitgehend dem der Nanoindentationsversuche gleich. Die auf den gewählten Berkovich-Indenter im Falle der Mikroindentation aufgebrauchte Kraft wurde dabei so gewählt, dass die Eindringtiefe des Indenters im Mittel ca. 25 μm betrug. Die Last-Eindringtiefe-Kurven wurden wiederum hinsichtlich der Eindringhärte H_{micro} , Steifigkeit M_{micro} und dem Kriechmodul C_{micro} bewertet. Die so ermittelten Kennwerte geben dabei die mechanischen Eigenschaften des Verbunds aus LD- und HD-CSH, der Mischphasen, der nicht-hydratisierten Zementklinkerpartikel und der gebildeten Kapillarporen wieder.

Abb. 6 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchungen als Funktion des Hydratationsgrads im Vergleich zu den ebenfalls in Abb. 6 dargestellten mechanischen Eigenschaften von LD- und HD-CSH. Aus dem Vergleich der mechanischen Eigenschaften der Mikrostrukturbausteine LD- und HD-CSH mit den Eigenschaften des gesamten Zementsteins wird deutlich, dass die Steifigkeit M und das Kriechverhalten C maßgeblich durch die mechanischen Eigenschaften des LD-CSH dominiert werden. Die signifikant höheren Werte für H der LD- und HD-CSH-Phasen im Vergleich zur Härte des mittels Mikroindentation ermittelten Zementsteins konnte auf eine verstärkte Rissneigung im Mikroindentationsversuch zurückgeführt werden.

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass die mechanischen Eigenschaften von Zementstein unmittelbar auf die mechanischen Eigenschaften der schwächsten Komponente des Zementsteins, nämlich der LD-CSH-Phasen zurückgeführt werden können. Diese Erkenntnis liefert die Grundlage für eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit und Nachhaltigkeit des Betons. Gelingt es, entweder den Anteil an HD-CSH-Phasen im Beton zu steigern oder die Packungsdichte der LD- und HD-CSH-Phasen zu erhöhen, so können die makroskopischen Eigenschaften unmittelbar gesteuert werden. Für diese Steuerung liegen verschiedene Ansätze vor, die bislang jedoch noch nicht untersucht und validiert sind.

4 Zusammenfassung

Zur Reduktion der Umweltwirkungen bei der Betonherstellung werden derzeit vielfältige neue Ansätze untersucht, die zum Ziel haben, entweder den Gehalt an Portlandzementklinker bei der Betonherstellung zu reduzieren oder neuartige Zemente mit einem

stark reduzierten Gehalt an CaO zu entwickeln. Analog zum Portlandzement hydratisieren auch die neuen Zementarten bzw. Zement-Zusatzstoffgemische im Kontakt mit Wasser und bilden Calcium-Silikat-Hydrat-Phasen, die dem Beton seine Festigkeit verleihen. Verschiedene Untersuchungen zeigen jedoch, dass sich die so gebildeten CSH-Phasen teilweise signifikant von den bei der Hydratation von Portlandzement gebildeten Phasen unterscheiden. Zielsetzung aktueller Arbeiten ist es daher, den Einfluss der Struktur, des Anteils und der Eigenschaften der CSH-Phasen auf die mechanischen Eigenschaften des Zementsteins vorhersagbar zu machen. Hierzu wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen zur Struktur und Mechanik von CSH-Phasen durchgeführt.

Das zentrale Ergebnis dieser Untersuchungen ist, dass die mechanischen Eigenschaften von Beton unmittelbar auf die Eigenschaften der schwächsten Phase im Beton, nämlich der sog. LD-CSH-Phase zurückgeführt werden können. LD-CSH besteht wiederum aus nanogranularen CSH-Partikeln, deren mechanische Eigenschaften aus Computersimulationen bekannt sind. Die mechanischen Eigenschaften der LD-CSH-Phasen können durch eine Veränderung der Packungsdichte der Nanopartikel gesteuert werden. Unbekannt ist bislang, wie einzelne Maßnahmen, wie beispielsweise die Zugabe von Silikastaub oder Flugasche zu Beton, in diese Packungsprozesse eingreifen.

5 Literatur

- [1] Ludwig, H. -M.: Neuartige Bindemittel - Die Zeit nach dem Portlandzement. In: Dehn, F.; Nolting, U.; Haist, M.; Link, J. (Hrsg.): 14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, 2017
- [2] Heinz, D.; Heisig, A.: Flugasche und Hüttensand - Zusatzstoffe mit Zukunft? In: Dehn, F.; Nolting, U.; Haist, M.; Link, J. (Hrsg.): 14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, 2017
- [3] Thienel, Ch.; Beuntner, N.: Calcinierte Tone und ihr Potenzial für die moderne Betontechnologie. In: Dehn, F.; Nolting, U.; Haist, M.; Link, J. (Hrsg.): 14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, 2017
- [4] Chen, C.; Habert, G.; Bouzidi, Y.; Jullien, A.; Ventura, A.: LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: An application to mineral additions in concrete. In: Resources, Conservation and Recycling 54 (2010), Nr. 12, pp. 1231-1240
- [5] Haist, M.; Moffatt, J. S.; Breiner, R.; Müller, H. S.: Entwicklungsprinzipien und technische Grenzen der Herstellung zementarmer Betone. In: Beton- und Stahlbetonbau 109 (2014), Nr. 3, pp. 202-215
- [6] Müller, Ch.: Dauerhafte Betone mit kalksteinhaltigen Zementen. In: Dehn, F.; Nolting, U.; Haist, M.; Link, J. (Hrsg.): 14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, 2017
- [7] Abdolhosseini Qomi, M.; Krakowiak, K. J.; Bauchy, M.; Stewart, K. L.; Shahsavari, Setareh; Jagannathan, D.; Brommer, Dieter Bresnan; Baronnet, A.; Buehler, Markus J.; et al.: Combinatorial molecular optimization of cement hydrates. In: Nature Communications 5 (2014)
- [8] Richardson, I. G.: The calcium silicate hydrates. In: Cement and concrete research 38 (2008), Nr. 2, pp. 137-158
- [9] Andersen, M. D.; Jakobsen, H. J.; Skibsted, J.: Characterization of white Portland cement hydration and the CSH structure in the presence of sodium aluminate by ^{27}Al and ^{29}Si MAS NMR spectroscopy. In: Cement and Concrete Research 34 (2004), Nr. 5, pp. 857-868
- [10] Nonat, A.; Pochard, I.; Labbez, C.; Plassard, C.; Lesniewska, E.; Jönsson, B.: Nanoscale investigation of particle interactions at the origin of the cohesion of cement. In: Langmuir 21 (2005), S. 7263-7270
- [11] Tennis, P. D.; Jennings, H. M.: A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes. In: Cement and Concrete Research 30 (2000), Nr. 6, pp. 855-863
- [12] Jennings, H. M.: Refinements to colloid model of CSH in cement: CM-II. In: Cement and Concrete Research 38 (2008), Nr. 3, pp. 275-289
- [13] Constantinides, G.; Ulm, F. J.: The effect of two types of CSH on the elasticity of cement-based materials: Results from nanoindentation and micromechanical modeling. In: Cement and Concrete Research 34 (2004), Nr. 1, pp. 67-80
- [14] Vandamme, M.; Ulm, F.-J.: Nanoindentation investigation of creep properties of calcium silicate hydrates. In: Cement and Concrete Research 52 (2013), pp. 38-52
- [15] Bentur, A.; Milestone, N.B.; Young, J.F.: Creep and drying shrinkage of calcium silicate pastes II. induced microstructural and chemical changes. In: Cement and Concrete Research 8 (1978), Nr. 6, pp. 721-732
- [16] Rostásy, F. S.; Krauß, M.; Budelmann, H.: Planungswerkzeug zur Kontrolle der frühen Ribbildung in massigen Betonbauteilen, Teil 3: Eigenschaften und Stoffmodelle jungen Betons. In: Bautechnik 79 (2002), Nr. 9, pp. 641-647

[17] Byfors, J.: Plain Concrete at Early Ages, Swedisch Cement and Concrete Research Institute, 1980

[18] De Schutter, G.; Taerwe, L.: Degree of hydration-based description of mechanical properties of early age concrete. In: Materials and Structures 29 (1996), Nr. 6, pp. 335-344

[19] Zhang, Jie; Scherer, G. W: Comparison of methods for arresting hydration of cement. In: Cement and Concrete Research 41 (2011), Nr. 10, pp. 1024-1036

[20] Oliver, W. C.; Pharr, G. M.: Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. In: Journal of materials research 19 (2004), Nr. 01, pp. 3-20

[21] Vandamme, M.: The nanogranular origin of concrete creep - A nanoindentation investigation of microstructure and fundamental properties of calcium-silicate-hydrates, Disseration, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, 2008

[22] Krakowiak, K. J. ; Wilson, W. ; James, S. ; Musso, S.; Ulm, F. -J.: Inference of the phase-to-mechanical property link via coupled X-ray spectrometry and indentation analysis: Application to cement-based materials. In: Cement and Concrete Research 67 (2015), pp. 271-285

Autor

Dr.-Ing. Michael Haist

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Gotthard-Franz-Str. 3
76131 Karlsruhe

Dauerhafte Betone mit kalksteinhaltigen Zementen

Christoph Müller

Zusammenfassung

Die Dauerhaftigkeit der Baustoffe spielt eine wesentliche Rolle bei der Errichtung nachhaltiger Bauwerke. Die besondere Herausforderung besteht darin, den umweltpolitischen Randbedingungen des Klimaschutzes und der Ressourceneffizienz gerecht zu werden und zur gleichen Zeit die Langlebigkeit der Betonbauwerke als zentrale Nachhaltigkeitskomponente nicht aus den Augen zu verlieren. Moderne Betone müssen sich in völlig unterschiedlichen Umgebungsbedingungen und Anwendungsbereichen bewähren. Am Beispiel von kalksteinhaltigen Zementen wird gezeigt, welche Nachweiskonzepte zur Verfügung stehen. Zemente mit langjähriger Praxisbewährung werden in weiten Teilen des Betonbaus nach deskriptiven Regeln eingesetzt. Der Nachweis der Dauerhaftigkeit mit Laborprüfungen erfolgt bei besonderen Anforderungen oder bei Betonausgangsstoffen ohne Langzeiterfahrung z. B. in Zulassungsverfahren. Lebensdauer- bzw. Grenzzustandsbetrachtungen erlauben schließlich eine Betrachtung am Bauteil unter Abschätzung realer Umgebungsbedingungen.

1 Anteile und Anwendungsbereiche bewährter Zemente

Die aktuellen Betonnormen DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 enthalten die Anwendungsregeln für Normalzemente in Abhängigkeit von den Expositionsklassen. Zum Zeitpunkt der Einführung dieser Normen galten für einige Normalzemente Anwendungsbeschränkungen, die vor allem auf die in Deutschland noch nicht hinreichenden praktischen Erfahrungen zurückzuführen waren. Für diese Zemente wurden seit dem Jahr 2004 insgesamt 24 allgemeine bauaufsichtliche Anwendungszulassungen (abZ-AZ) für CEM II-Zemente erteilt. Hierbei entfielen 13 Zulassungen auf CEM II/B-M (S-LL), 6 Zulassungen auf CEM II/B-M (V-LL), zwei Zulassungen auf CEM II/B-M (T-LL) sowie jeweils eine Zulassung auf CEM II/B-LL und CEM II/B-P. Bis auf den CEM II/B-P handelte es sich somit um kalksteinhaltige Zemente.

Aktuell dürfen damit folgende **Zementarten in allen Expositionsklassen** verwendet werden:

- Portlandzement CEM I,
- Portlandhüttenzemente CEM II/A-S und CEM II/B-S,
- Portlandschieferzemente CEM II/A-T und CEM II/B-T,
- **Portlandkalksteinzemente CEM II/A-LL,**
- Portlandflugaschezemente CEM II/A-V und CEM II/B-V,
- **Portlandkompositzemente CEM II/A-M mit S, LL, T, V bzw. D¹⁾,**

- Portlandkompositzemente CEM II/B-M mit S, T, V bzw. D¹⁾,
- **Portlandkompositzemente mit abZ (Anwendungszulassung AZ),**
- Hochofenzemente CEM III/A²⁾.

¹⁾ (D-V) nicht in XF2/XF4

²⁾ Expositionsklasse XF4: CEM III/A der Festigkeitsklasse $\geq 42,5$ N oder der Festigkeitsklasse 32,5 R mit bis zu 50 M.-% Hüttensand

In Deutschland waren in 2016 rd. 29 % der Zemente im Inlandversand der VDZ-Verbandsmitglieder Portlandzemente CEM I. Portlandzement CEM I enthält keine weiteren Hauptbestandteile außer Portlandzementklinker. 47 % des Inlandversands sind Portlandkompositzemente CEM II/A und CEM II/B, die außer Portlandzementklinker noch zwischen 6 M.-% bzw. 12 M.-% und 35 M.-% andere Hauptbestandteile enthalten – in Deutschland im Wesentlichen Hüttensand und **Kalkstein**. Hochofenzemente CEM III machen 24 % des Inlandversands aus. Unter diesen Bedingungen beträgt der mittlere Klinker/Zement-Faktor in Deutschland rd. 0,72.

2 Leistungsfähigkeit neuer, klinkereffizienter Zemente mit Hüttensand und Kalkstein

2.1 Allgemeines

Mehrere Forschungsprojekte im VDZ beschäftigen sich mit der Frage, welche Möglichkeiten bestehen, den mittleren Klinker/Zement-Faktor weiter zu senken. Neben der technischen Leistungsfähigkeit spielt

die Verfügbarkeit der Ausgangsstoffe eine wesentliche Rolle. Da bei neuen Zementen die bestehenden Anwendungsregeln bewährter Zemente nicht einfach übertragen werden können, wird die Leistungsfähigkeit der Zemente im Beton anhand von Laborversuchen untersucht. Die hierbei verwendeten Prüfmethode stammen aus nationalen Zulassungsverfahren, die überwiegend Eingang in europäische Bewertungsdokumente (EAD) gefunden haben (vgl. **EAD 15001-00-0301; OJEU 2017/C 118/04**). Darauf aufbauend wurden in einigen Fällen Grenzzustandsbetrachtungen nach fib Model Code „Service Life Design“ bzw. ISO 16204 vorgenommen.

2.2 Laborversuche

2.2.1 Überblick

In [1] wurde festgestellt, dass Zemente mit bis zu 50 M.-% Kalkstein als Hauptbestandteil zur Herstellung von Betonen mit zulassungsfähigen Dauerhaftigkeitseigenschaften verwendet werden können. Hierzu war es aber erforderlich, den Wasserzementwert bis auf $w/z = 0,35$ abzusenken. Um eine praxiserichte Verarbeitbarkeit zu erreichen, war neben der gezielten Abstimmung der Zementhauptbestandteile der auf den Zement abgestimmte Einsatz der Betonzusatzmittel bei angemessenem Leimgehalt ein Schlüssel zum Erfolg. Weiterhin zeigte sich, dass bei bestimmten Dauerhaftigkeitseigenschaften (z. B. beim Chlorideindringwiderstand) im Hinblick auf besonders exponierte Umgebungsbedingungen noch Optimierungspotential besteht. Gerade mit Blick auf den Chlorideindringwiderstand wird dies möglich durch den Einsatz von Hüttensand als drittem Hauptbestandteil. In neueren Untersuchungen [2] wurde im Vergleich zu [1] ein entsprechend umfangreicheres Zusammensetzungsfeld im Dreistoffsystem Klinker (K) – Hüttensand (S) – Kalkstein (LL) untersucht. Die Zusammensetzung der Zemente orientierte sich an den Eckpunkten der geplanten Erweiterung der EN 197-1. Die Dauerhaftigkeit der Betone wurde mit den Methoden untersucht, die sich im vorangegangenen Forschungsvorhaben bewährt hatten und im Übrigen im Rahmen von Zulassungen relevant wären. Diese wurden durch die Schnellkarbonatisierung und die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes ergänzt.

Ein CEM I 52,5 R, ein CEM I 42,5 N und ein CEM III/A 42,5 N wurden als Referenz- bzw. Ausgangszemente verwendet. Die Prüfzemente wurden durch Mischen eines CEM I 52,5 R mit den gesondert gemahlene vier Hüttensanden bzw. einem gemahlene Kalkstein hergestellt. Die Zemente wurden nach folgendem Prinzip bezeichnet:

CEM (50K, 30S, 20 LL) – 50 M.-% CEM I 52,5 R, 30 M.-% Hüttensand, 20 M.-% Kalkstein

Für die Mörtelversuche erfolgte das Mischen der Komponenten im Labor. Für die Betonversuche wurden werkseitig produzierte Zemente verwendet. Die Druckfestigkeit sowohl von Normmörteln als auch von Mörteln mit abweichenden Zementgehalten und Wasserzementwerten wurde nach 2, 7, 28 und 91 Tagen gemäß DIN EN 196-1 geprüft. Normmörtel mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,50$ wurden gemäß DIN EN 196-1 prinzipiell ohne die Verwendung von Fließmitteln mit einem Zementgehalt von 450 g je Mischung hergestellt. Mörtel mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,40$ wurden, um einen konstanten Leimgehalt von rd. 420 l/m^3 beizubehalten, mit einem Zementgehalt von 500 g je Mischung hergestellt, Mörtel mit $w/z = 0,35$ mit 535 g je Mischung. Ein PCE-basiertes Fließmittel wurde verwendet, um ein konstantes Ausbreitmaß von $160 \pm 10 \text{ mm}$ zu erzielen.

Aus einer Vielzahl im Mörtel untersuchter Zemente erfolgte die Auswahl der Zemente für die Beton-/Dauerhaftigkeitsuntersuchungen anhand folgender Kriterien:

- Der Zement **CEM (50K, 30S, 20 LL) „Z1“** zeigte in einem Normmörtel mit $w/z = 0,50$ vergleichbare Festigkeiten wie die Referenzzemente CEM I 42,5 N und CEM III/A 42,5 N. Der Zement stellt die „Grenzzusammensetzung“ zwischen den zukünftig in EN 197-1 genormten Zementen CEM II/C-M (S-LL) und CEM VI sowie dem hier untersuchten neuen Zusammensetzungsfeld dar.
- Der Zement **CEM (35K, 30S, 35 LL) „Z2“** zeigte in einem Mörtel mit $w/z = 0,40$ vergleichbare Festigkeiten wie die Referenzzemente CEM I 42,5 N und CEM III/A 42,5 N im Normmörtel mit $w/z = 0,50$.
- Der Zement **CEM (20K, 30S, 50 LL) „Z3“** weist mit einem Kalksteingehalt von 50 M.-% den in [1] ermittelten maximalen Kalksteingehalt für solche Zemente auf, die mit angepasster Beton-technologie im Beton zulassungsfähige Dauerhaftigkeitseigenschaften zeigten.

Tab 1: Betonrezepturen [2]

Parameter/Kennwert	Beton		
	B1	B2	B3
Zementgehalt in kg/m^3	320	365	390
Wasserzementwert	0,50	0,40	0,35
Leimgehalt in l/m^3	290 ± 5		
Ausbreitmaß in mm	500 ± 20		

Für die Betone wurde der Wasserzementwert unter Beibehaltung des Leimgehalts variiert und durch die Verwendung von Fließmitteln ein Ausbreitmaß von $500 \pm 20 \text{ mm}$ eingestellt. Tabelle 1 zeigt die verwendeten Betonrezepturen. Als Gesteinskörnung wurde Rheinkies sand der Sieblinie A16/B16 verwendet. Folgende Ergebnisse wurden erzielt:

2.2.2 Betondruckfestigkeit

Der Beton B1 mit Zement Z1 (50 % K) zeigte vergleichbare Festigkeiten wie die Betone B1 mit den Referenzzementen. Mit weiter abnehmendem Klinkergehalt sank die Festigkeit zu allen Prüfzeitpunkten erwartungsgemäß. Die Betone B2 mit Zement Z2 bzw. B3 mit Zement Z3 wiesen etwas höhere Festigkeiten auf als die Referenzbetone. Die Festigkeit des Betons alleine ist jedoch kein hinreichendes Merkmal für alle Dauerhaftigkeitseigenschaften.

2.2.3 Karbonatisierung

Die Karbonatisierungstiefen wurden an Feinbetonprismen mit den Abmessungen 40 mm x 40 mm x 160 mm und einer Sieblinie A8/B8 ermittelt.

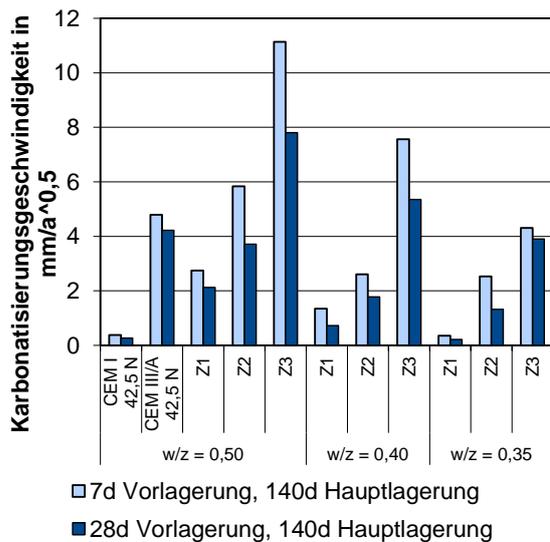
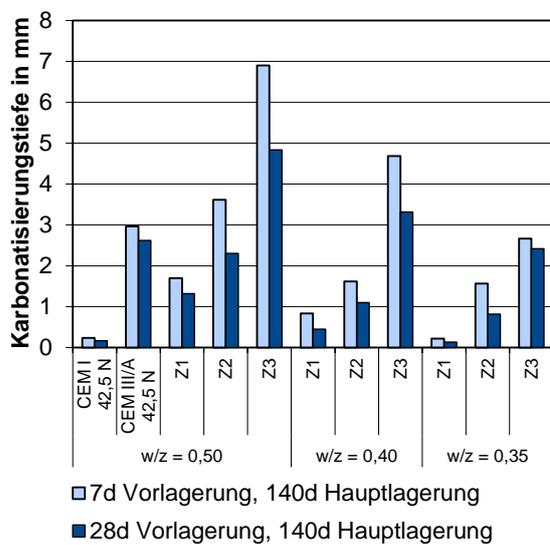


Abb.1: Karbonisierungstiefen (oben) und Karbonisierungsgeschwindigkeiten (unten) von Feinbetonen nach 140 d Hauptlagerung [2]

Dies entspricht den Randbedingungen in Zulassungsverfahren des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) für Zemente. Mörtel mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,50$ wurden ohne die Verwendung von Fließmitteln mit einem Zementgehalt von 450 g je Mischung hergestellt (gemäß DIN EN 196-1). Mörtel mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,40$ wurden, um einen konstanten Leimgehalt beizubehalten, mit einem Zementgehalt von 500 g je Mischung hergestellt. Für Mörtel mit $w/z = 0,35$ wurden 535 g Zement je Mischung verwendet. Jeweils die Hälfte der Prismen wurde 7 Tage in Wasser mit einer Temperatur von $(20 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ vorgelagert, die andere Hälfte lagerte 28 Tage in Wasser mit einer Temperatur von $(20 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$. Anschließend lagerten die Probekörper bei einer Temperatur von $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ und einer relativen Feuchte von $(65 \pm 5) \%$. Die Karbonisierungstiefen nach 140 Tagen Lagerung bei einer CO_2 -Konzentration von 0,04 % sind in Bild 1 dargestellt. Die Karbonisierungsgeschwindigkeiten sind in $\text{mm/a}^{0,5}$ angegeben. Diese Einheit entspricht dem derzeitigen Diskussionsstand über die Definition von möglichen Karbonisierungsklassen in der europäischen Normung.

Die Mörtel bzw. Zemente wiesen in den meisten Fällen zulassungsfähige Karbonisierungsgeschwindigkeiten auf. Die Werte lagen i. d. R. unterhalb der Bewertungskriterien in Tabelle 2.

Tab. 2: Bewertungskriterien für Karbonatisierung gemäß [3]

Vorlagerung unter Wasser	Druckfestigkeit nach Vorlagerung	Karbonisierungsgeschwindigkeit nach 140 d Hauptlagerung
	N/mm ²	mm/d ^{0,5}
7d	bis ~ 30	$\leq 0,50$
28d	bis ~ 45	$\leq 0,35$
7d	~ 30-44	$\leq 0,50 - (f_{ps} - 30) \times 0,01857$
28d	~ 45-60	$\leq 0,35 - (f_{ps} - 44,5) \times 0,01290$

f_{ps} = Druckfestigkeit nach Vorlagerung
Die Hauptlagerung erfolgte bei 20 °C / 65 % r. F. und 0,04 % CO_2

In Abbildung 2 sind die Karbonisierungsgeschwindigkeiten in den Bewertungshintergrund gemäß Anhang B aus [3] eingeordnet. Die hier verwendete Einheit ist $\text{mm/d}^{0,5}$. Nicht eingezeichnete Mörtel haben zu hohe Druckfestigkeiten für die vorgegebene Skalierung. Die Mörtel - ggf. mit angepassten Wasserzementwerten - liegen bei einer Vorlagerung von 7 Tagen unterhalb der mit einer schwarzen Linie gekennzeichneten Grenzwertfunktion gemäß Tabelle 2. Bei einer Vorlagerung von 28 Tagen liegen die

Ergebnisse im Bereich des Grenzwertes bzw. in einem Fall darüber.

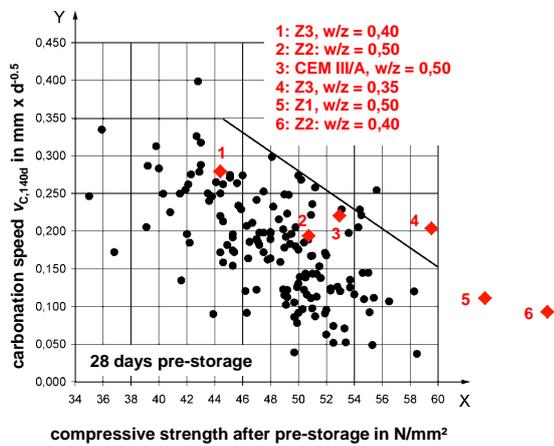
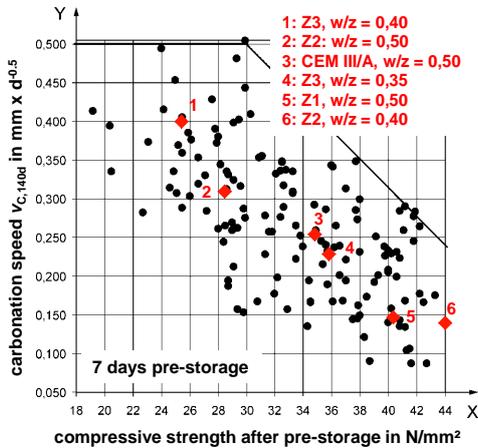


Abb. 2: Einordnung der Ergebnisse aus [2] in den Bewertungshintergrund gemäß Anhang B aus [3] - oben: Vorlagerung 7d; unten: Vorlagerung 28d

2.2.4 Chlorideindringwiderstand

Alle Betone mit Prüfzementen Z1-Z3 wiesen unabhängig vom Wasserzementwert geringe Chloridmigrationskoeffizienten - d. h. hohe Widerstände gegen das Eindringen von Chloriden - auf. Damit konnte eine wesentliche „Schwäche“ der in [1] untersuchten Zemente, die ausschließlich Kalkstein als weiteren Hauptbestandteil enthielten, beseitigt werden. Ein Hüttensandgehalt von 30 M.-% Hüttensand war bei den im Forschungsvorhaben untersuchten Zementen ausreichend, um einen hohen Chlorideindringwiderstand für Anwendungen z. B. im Wasserbau ($\leq 10 \times 10^{-12} \text{ m/s}^2$ für XS1-2, XD1-2 bzw. $\leq 5 \times 10^{-12} \text{ m/s}^2$ für XS3, XD3 gemäß [4]) sicherstellen zu können.

2.2.5 Verhalten der Betone im CIF-Verfahren gemäß CEN/TR 15177

Abbildung 3 zeigt, dass die Zemente Z1-Z3 bei Verwendung im Beton B1 zu Abwitterungen bzw. einem relativen dynamischen E-Modul oberhalb bzw. unterhalb des Bewertungskriteriums führten (= Versuch nicht bestanden). Eine Absenkung des Wasserzementwertes auf $w/z = 0,40$ führte zu einer deutlich geringeren Abnahme des relativen dynamischen E-Moduls. Der Beton mit Zement Z1 liegt oberhalb des Bewertungskriteriums. Bei einer weiteren Absenkung des Wasserzementwertes auf $w/z = 0,35$ liegen auch die Betone mit Zement Z2 und Zement Z3 oberhalb des Bewertungskriteriums (relativer dynamischer E-Modul nach 28 Frosttauwechseln $\geq 75 \%$) - Abbildung 4. Das Abwitterungskriterium (1000 g/m^2 nach 28 Frosttauwechseln) wird für Wasserzementwerte $w/z < 0,50$ in jedem Fall eingehalten.

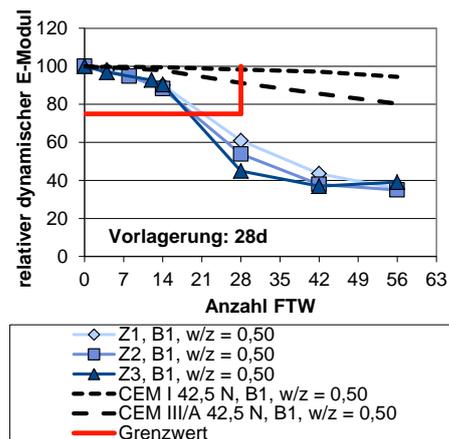
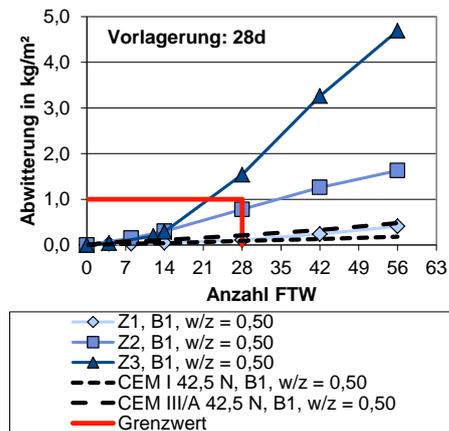


Abb. 3: Abwitterung und relativer dynamischer E-Modul von Betonen mit Wasserzementwerten $w/z = 0,50$; 28d Vorlagerung [2]

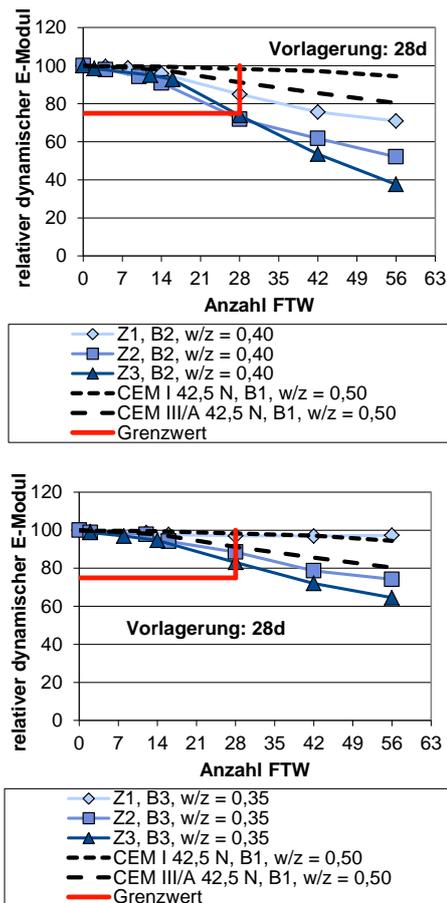


Abb. 4: Relativer dynamischer E-Modul von Betonen mit Wasserzementwerten $w/z = 0,40$ und $w/z = 0,35$ (Referenzen mit $w/z = 0,50$); 28d Vorlagerung [2]

3 Grenzzustandsbetrachtungen

3.1 Allgemeines

Mit Grenzzustandsbetrachtungen nach fib Model Code „Service Life Design“ bzw. ISO 16204 wurde aufbauend auf den bereits gezeigten und weiteren Versuchsergebnissen in [5] die rechnerische Leistungsfähigkeit der Betone bei der Verwendung in Stahlbetonbauteilen mit für Deutschland typischen Umgebungsbedingungen untersucht (Expositionsklassen XC3, XD2). Für die betrachteten Grenzzustände „Depassivierung der Bewehrung infolge Carbonatisierung“ (kurz: Grenzzustand Carbonatisierung) und „Erreichen des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts auf Höhe der Bewehrung“ (kurz: Grenzzustand Chlorideindringen) wurde die jeweilige Entwicklung des Zuverlässigkeitsindex über der Zeit ausgewertet und daraus eine rechnerische „Lebensdauer“ abgeleitet. Die rechnerische „Lebensdauer“ gibt dabei als Zeitspanne bis zum Unterschreiten eines minimalen Zuverlässigkeitsindex von $\beta = 0,5$ (Zielzuverlässigkeit) an. Die experimentellen Untersuchungen umfassten Versuche zum Carbonatisierungsverhalten und Chlorideindringwiderstand.

Bei der Wahl der Betonzusammensetzungen lag der Fokus auf der Variation der Zementart in zwei hinsichtlich Wasserzementwert und Zementgehalt verschiedenen Grundzusammensetzungen (B0: $z = 280 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,65$; B1: $z = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$). Es wurden zum einen Zemente eingesetzt, deren Verwendung für alle Expositionsklassen zugelassen ist (CEM I, CEM II/A-LL, CEM III/A) und zum anderen neue Zemente, für die es hinsichtlich Carbonatisierung und Chlorideindringen wenig bzw. keine Praxiserprobung gibt (CEM II/B-LL, CEM II/B-M (S-LL), CEM X).

Das Carbonatisierungsverhalten der Betone wurde mit verschiedenen Prüfverfahren sowohl bei natürlicher als auch bei erhöhter CO_2 -Konzentration untersucht. Der Widerstand der Betone gegenüber eindringenden Chloriden wurde durch Chloridmigrations- und Chloriddiffusionsversuche untersucht, wobei jeweils das Alter zu Versuchsstart bzw. die Beaufschlagungsdauer variiert wurden.

3.2 Carbonatisierung

Die Ergebnisse der Carbonatisierungsversuche zeigten deutliche Einflüsse sowohl der Zementart als auch des Wasserzementwertes auf das Carbonatisierungsverhalten.

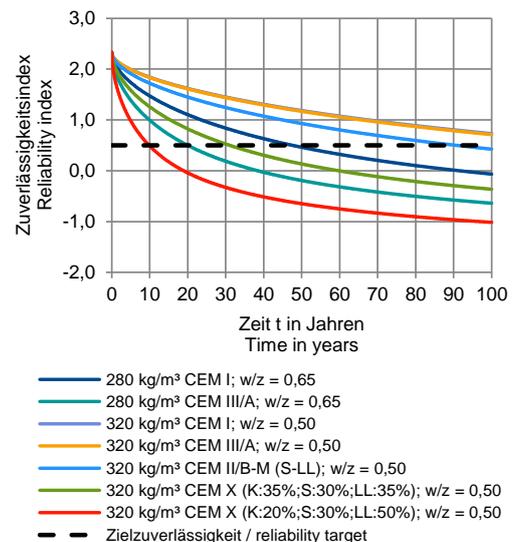


Abb. 5: Entwicklung des Zuverlässigkeitsindex für den Grenzzustand Carbonatisierung für XC3 [5]

Wurde bei identischer Zusammensetzung des Betons die Zementart variiert, waren die bei natürlicher CO_2 -Konzentration bestimmten Carbonatisierungstiefen umso größer, je geringer der Klinkergehalt des Zements war. Die Erhöhung der Carbonatisierungstiefen als Folge der Verringerung des Klinkergehaltes konnte teilweise durch eine hinsichtlich w/z -Wert und Zementgehalt optimierte Betonzusammensetzung (B1 statt B0) ausgeglichen werden.

Die probabilistischen Grenzzustandsberechnungen zur Carbonatisierung ergaben einen großen Wertebereich für die rechnerische „Lebensdauer“ der untersuchten Betone, vgl. Bild 5. Für die Grundzusammensetzung B1 in Kombination mit den Zementarten CEM I, CEM III/A und CEM II/B-M (S-LL) wurden hohe rechnerische „Lebensdauern“ von über 90 Jahren erreicht. Für die weiteren untersuchten Betone waren die rechnerischen „Lebensdauern“ geringer als die in der Regel für Stahlbetonbauwerke geforderte Mindestnutzungsdauer von 50 Jahren.

3.3 Chlorideindringen

In den Versuchen zum Chlorideindringen wurde eine deutliche Trennung der Ergebnisse in zwei Gruppen festgestellt. Die Betone mit den Zementarten CEM III/A und CEM X mit 30 M.-% Hüttensand zeigten vergleichsweise geringe Chloridmigrations- bzw. Chloriddiffusionskoeffizienten, während sich für die Betone mit den Zementarten CEM I, CEM II/A-LL und CEM II/B-LL unabhängig vom w/z-Wert und Zementgehalt deutlich höhere Werte ergaben.

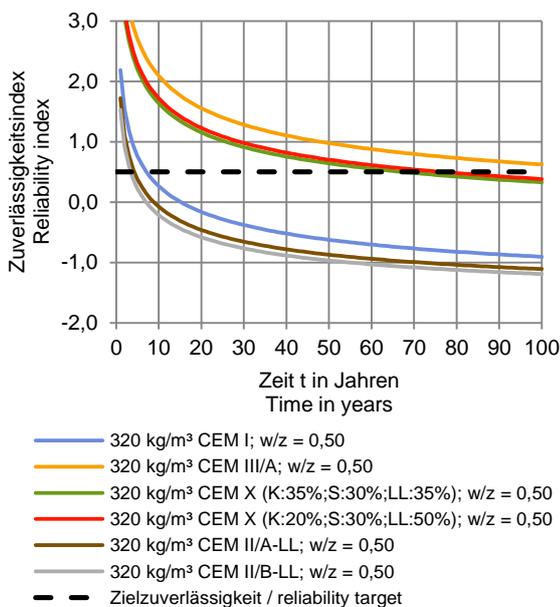


Abb. 6: Entwicklung des Zuverlässigkeitsindex für den Grenzzustand Chlorideindringen für XD2 [5]

In den Untersuchungen zum Grenzzustand Chlorideindringen zeigte sich eine direkte Übertragbarkeit der Gruppierung der Chloridmigrationskoeffizienten auf die rechnerischen „Lebensdauern“, vgl. Abbildung 6. Für die Betone in der Grundzusammensetzung B1 mit der Zementart CEM X mit 30 M.-% Hüttensand wurden rechnerische „Lebensdauern“ von deutlich über 50 Jahren, bei Verwendung von CEM III/A mit rd. 50 % Hüttensand sogar von über 100 Jahren bestimmt. Die Betone mit CEM I, CEM II/A-LL und CEM II/B-LL erreichten dagegen rechnerische „Lebensdauern“ von weniger als

10 Jahren, sodass bei Verwendung dieser Betone innerhalb einer Nutzungsdauer von 50 Jahren nach diesen Berechnungen mit einer Depassivierung der Bewehrung zu rechnen wäre.

4 Literatur

- [1] Müller, Christoph; Palm, Sebastian; Graubner, Carl-Alexander; Proske, Tilo; Hainer, Stefan; Rezvani, Moien; Neufert, Winfried; Reuken, Ines. Zemente mit hohen Kalksteingehalten - Dauerhaftigkeit und praktische Umsetzbarkeit: Betontechnische Berichte. Beton 2014, S. 43-50, 21-30
- [2] Neufert, Winfried; Reuken, Ines; Müller, Christoph; Palm, Sebastian; Graubner, Carl-Alexander; Proske, Tilo; Rezvani, Moien. Leistungsfähigkeit klinkereffizienter Zemente mit Hüttensand und Kalkstein: Betontechnische Berichte. Beton 2017, S. 89-97
- [3] CEN/TR 16563:2013: Principles of the equivalent durability procedure (Verfahrensgrundsätze zum Nachweis gleichwertiger Dauerhaftigkeit)
- [4] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). Merkblatt: Chlorideindringwiderstand von Beton. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, BAW 2012
- [5] „Grenzzustandsbezogene Optimierung von Betonzusammensetzungen: Ein Schritt zur weiteren Reduzierung der CO₂-Emissionen bei der Herstellung von Beton“ - Forschungsvorhaben Nr. T218/24815/2013 gefördert durch die Dres. Edith und Klaus Dyckerhoff-Stiftung. Projektzeitraum: 07/2013 - 06/2017 (unveröffentlicht)

Autor

Dr.-Ing. Christoph Müller

Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ)

Tannenstraße 2
40476 Düsseldorf

Flugasche und Hüttensand – Zusatzstoffe mit Zukunft?

Detlef Heinz und Anne Heisig

Zusammenfassung

Durch den Zwang zur Einsparung von CO₂-Emissionen werden Betone, bei denen Portlandzementklinkeranteile durch Zusatzstoffe wie z.B. Steinkohlenflugasche oder Hüttensand ausgetauscht werden, ökologisch und ökonomisch immer attraktiver. Die hier betrachteten puzzolanisch bzw. latent-hydraulisch reagierenden Sekundärrohstoffe weisen trotz ihrer unterschiedlichen Entstehungsgeschichte wesentliche Parallelen auf, die sie als ideale Partner für die Zementhydratation qualifizieren. Reaktiv werden beide Stoffe vor allem durch ihre Glasphase, deren Zusammensetzung und Auflösungsgeschwindigkeit das Verhalten bei den Hydratationsreaktionen im Beton bestimmt und die sich auch auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften auswirkt, ebenso wie auf die Erhärtungsgeschwindigkeit, Nachbehandlungsempfindlichkeit, Nacherhärtung und die Dauerhaftigkeit. In den letzten Jahren waren die Forschungsbestrebungen darauf ausgerichtet, immer größere Anteile an Portlandzementklinker durch mehr oder weniger reaktive Stoffe zu ersetzen. Werden große Mengen an Flugasche oder Kombinationen verschiedener Zementhauptbestandteile, wie Hüttensand, Flugasche oder Kalksteinmehl, im Bindemittel verwendet, bedingt dies einen veränderten Mischungsentwurf bei der Betonherstellung. Vor allem um Festigkeiten und Dauerhaftigkeitseigenschaften herkömmlicher Betone mit Normzementen zu erreichen, wird oft eine Reduktion des w/z-Wertes beim Einsatz von hohen Dosierungen von Betonzusatzstoffen bzw. von mehrkomponentigen Zementen, deren Zusammensetzung jenseits der Norm liegt, erforderlich. Eine geschickte Kombination bestimmter Bindemittelhauptbestandteile unter Berücksichtigung chemisch/mineralogischer und physikalischer Zusammenhänge, eröffnet Möglichkeiten einer, gegenüber der in Normzementen realisierten, weitergehenden Reduktion der Klinkerquote. Zu berücksichtigen ist bei all diesen Untersuchungen und Überlegungen aber auch die künftige Verfügbarkeit der Klinkeraustauschmaterialien, hier also von Flugasche und Hüttensand. Beide Stoffe fallen als Sekundärprodukt bei energieintensiven Produktionsprozessen an. Bedingt durch die Energiewende in Deutschland werden Kohlekraftwerke künftig weiter zurückgefahren. Infolge dessen wird die Flugascheproduktion abnehmen. Mittelfristig kann allerdings noch mit einer ausreichenden Menge an Flugasche als Zusatzstoff gerechnet werden, da voraussichtlich im inner- und außereuropäischen Ausland weiterhin nennenswerte Mengen an Flugasche anfallen werden. Von Unsicherheiten betroffen ist auch die Höhe der Roheisenproduktion, zumindest in Europa, angesichts weltweiter Überkapazitäten. Seit Mitte der 1990er Jahre sind die Produktionsmengen an Stahl und damit an Roheisen und Hochofenschlacke weitestgehend stabil. Gestiegen ist hingegen die Produktion von Hüttensand durch gesteigerte Granulation der Schlacke und die erreichte Menge wird aktuellen Prognosen zufolge auch mittelfristig auf diesem Level zunächst erhalten bleiben.

1 Einführung

Flugasche und Hüttensand - zwei Sekundärrohstoffe, die in äußerst energieintensiven Prozessen mit hohen CO₂-Emissionen anfallen, dienen aber auch heute schon im großen Rahmen dazu CO₂-reduzierte Bindemittel herzustellen. Die hohe Nachfrage an diesen Materialien für den Baustoffsektor trifft auf politische und wirtschaftliche Vorgaben: die Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen zurückzufahren und den EU-Emissionshandel, der vor allem energieintensive Branchen, so auch die Stahlerzeugung, stark beeinflusst bzw. beeinflussen wird. Eng damit verknüpft sind die Mengen der beiden Sekundärrohstoffe, die in diesen Prozessen anfallen.

Im vorliegenden Beitrag sollen die Stoffe Flugasche und Hüttensand näher betrachtet werden.

Zum einen werden ihre stoffliche Zusammensetzung und die damit einhergehenden Reaktionsmechanismen sowie ihr Wirken im Gesamtsystem Beton beleuchtet. Zum anderen werden künftige Trends und Entwicklungen in der Baustoffforschung dargestellt. Abschließend wird die künftige Verfügbarkeit dieser Stoffe abgeschätzt, um die Zukunftsfähigkeit von Produkten, die mit diesen Materialien hergestellt werden, bewerten zu können.

2 Flugasche

2.1 Stoffliche Eigenschaften

Die Flugasche ist ein industrielles Nebenprodukt bei Verbrennungsprozessen und laut Definition nach DIN EN 450-1 (Flugasche für Beton) [1] ein

feinkörniger Staub aus kugelförmigen, glasigen Partikeln (Abbildung 1) aus der Verbrennung von Steinkohle und ausgesuchten und begrenzten Mengen von Mitverbrennungsstoffen, wie z.B. Klärschlamm. Flugasche besteht im Wesentlichen aus SiO_2 und Al_2O_3 (Tabelle 1) und besitzt puzzolanische Eigenschaften, was bedeutet, dass dieser Stoff zur Hydratationsreaktion Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) benötigt.

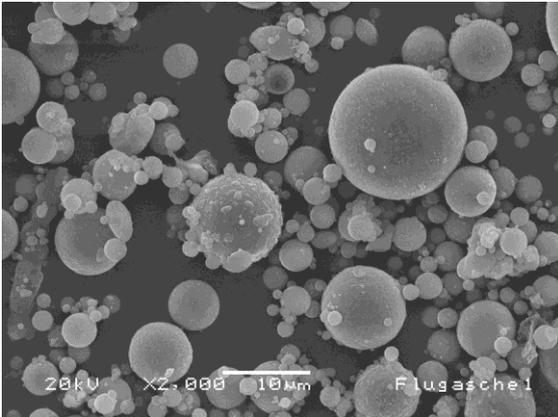


Abb. 1: Steinkohlenflugasche, rasterelektronenmikroskopische Aufnahme

Maßgebend für ihre puzzolanische Reaktionsfähigkeit sind die chemische Zusammensetzung und der Glasgehalt der jeweiligen Flugasche. Dabei wird zwischen kieselsäurereichen (CaO -Gehalt < 10 M.-%) und kalkreichen (CaO -Gehalt > 10 M.-%) Flugaschen unterschieden. Kieselsäurereiche Flugaschen können sowohl als Zementhauptbestandteil (DIN EN 197) als auch als Betonzusatzstoff (DIN EN 450) verwendet werden. Darüber hinaus ist es möglich kalkreiche Flugaschen als Zementhauptbestandteil einzusetzen. In Deutschland kommen jedoch in der Regel kieselsäurereiche Flugaschen zum Einsatz.

Tab. 1: Chemische Zusammensetzung von Steinkohlenflugaschen [2]

Komponenten	Anteil [M.-%]
SiO_2	36 - 59
Al_2O_3	20 - 35
Fe_2O_3	3 - 19
CaO	1 - 12
MgO	0,7 - 4,8
K_2O	0,5 - 6
Na_2O	0,1 - 3,5
SO_3	0,1 - 2
TiO_2	0,5 - 1,8
Glühverlust	0,5 - 5

Die chemische Zusammensetzung der Flugasche wird über die Zusammensetzung der verbrannten Ausgangsstoffe bestimmt. Insbesondere bei der Trockenfeuerung von Steinkohle fällt eine kieselsäurereiche Flugasche an, die aufgrund ihrer chemischen (Tabelle 1) und mineralogischen (Tabelle 2) Zusammensetzung besonders für die Anwendung in zementären Systemen geeignet ist und als Steinkohlenflugasche (SFA) bezeichnet wird. Im weiteren Text wird daher unter der Bezeichnung Flugasche immer die Steinkohlenflugasche verstanden.

Tab. 2: Mineralogische Zusammensetzung von Steinkohlenflugaschen [2]

Komponenten	Anteil [M.-%]
Glas (amorpher Anteil)	60 - 83
Mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)	4 - 25
Quarz (SiO_2)	4 - 18
Hämatit (Fe_2O_3)	0,5 - 2
Magnetit (Fe_3O_4)	1 - 7
Freikalk (CaO)	< 2
Flugkoks	0,5 - 5

Auf Grund der Oberflächenspannung bilden sich bei der Aufschmelzung der Kohleminerale kugelförmige Partikel, die eine geschlossene Oberfläche aufweisen. Man unterscheidet zwischen porenfreien Vollkugeln auch Hohlkugeln und gefüllten Hohlkugeln. Daraus ergibt sich eine Kornrohddichte zwischen $2,0 - 2,5 \text{ g/cm}^3$. Die spezifische Oberfläche ähnelt der von Zement ($3000 - 6000 \text{ cm}^2/\text{g}$, nach Blaine). [2]

2.2 Reaktionsmechanismen

Die Wirkung von Flugasche in Beton ist vielfältig. So dient sie zum einen als Füller (passiv), der Packungsdichte und Wasserrückhaltevermögen verbessern kann, sowie als Keimbildner (passiv), aber auch als Reaktionspartner (aktiv) für Hydratationsprodukte des Portlandzementes. Die zu großen Teilen aus einer amorphen Glasphase (Tabelle 2) bestehenden Flugaschen werden in der alkalischen Porenlösung des Zementsteins angelöst. Das bedeutet, dass vor allem Silicium und Aluminium aus der Glasphase der Flugasche freigesetzt wird. Zusammen mit dem Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) der bei der Zementhydratation entsteht, reagieren diese weiter zu C-S-H- und aluminiumhaltigen C-A-S-H-Phasen. Die Hydratationsprodukte besitzen ein geringeres C/S-Verhältnis, als die C-S-H-Phasen, die sich bei der regulären Hydratation des Portlandzementes bilden. Dies liegt an einem geringeren Calciumangebot in

diesem System. Da die Reaktion über die Löslichkeit und Lösungsgeschwindigkeit des Flugascheglasses gesteuert ist, verläuft die puzzolanische Reaktion der Flugasche in Abhängigkeit von pH-Wert der Zementporenlösung und der Größe der Flugaschepartikel verlangsamt im Vergleich mit der Hydratationsreaktion des Portlandzementes. In Abbildung 2 lässt sich das klar an der Druckfestigkeitsentwicklung von Mörteln erkennen. Während im frühen Alter die Festigkeit der flugaschehaltigen Mörtelproben deutlich unter der eines hydraulisch reagierenden Portlandzementes liegt, wird diese im höheren Alter der Proben von den flugaschehaltigen Mörteln deutlich überschritten [3].

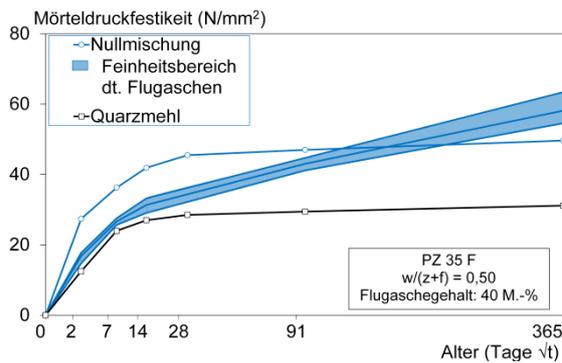


Abb. 2: Entwicklung der Druckfestigkeit an Mörteln mit Flugasche und Quarzmehl [3]

3 Hüttensand

3.1 Stoffliche Eigenschaften

Hüttensand ist, wie die Flugasche, ein industrielles Nebenprodukt, dass bei der Roheisenerzeugung hergestellt wird. Hierfür wird Hochofenschlacke durch Granulationsanlagen, heute meist über eine Nassgranulation, unter hohem Wasserüberschuss, abgeschreckt [4]. Die Schlacke erstarrt glasig (Abbildung 3). Der so gewonnene Hüttensand weist latent-hydraulische Eigenschaften auf.



Abb. 3: Hüttensand

Wie bei der Flugasche hat das Hüttensandglas enorme Auswirkungen auf die festigkeitsbildenden Eigenschaften des Hüttensandes. Beispielsweise muss, um als Zementbestandteil eingesetzt zu werden, der verwendete Hüttensand gemäß EN 197-1 einen Glasgehalt von mindesten 2/3 besitzen. In der Regel liegen die Glasgehalte von deutschen Hüttensanden deutlich über 95 M.-% [4], als weitere kristalline Anteile können auftreten: Gehlenit, Äkermanit, Melilith, Dicalciumsilikat, Merwinit, Perowskit, Monticellit oder auch Periklas. Diese mineralischen Phasen besitzen aber keine technisch nutzbaren, latent-hydraulischen Eigenschaften. [4, 5]

Maßgebend für die hydraulische Wirksamkeit des Hüttensandes ist neben dem Glasgehalt, auch die chemische Zusammensetzung (Tabelle 3) und die sogenannte Basizität oder der Basengrad. So wird das Verhältnis von CaO- und MgO-Gehalt zum SiO₂-Gehalt des Hüttensandes definiert. Liegt das Verhältnis > 1 gilt der Hüttensand als ausreichend basisch.

Tab. 3: Chemische Zusammensetzung von Hüttensanden, Westeuropa [5]

Komponenten	Anteil [M.-%]
SiO ₂	30 - 39
Al ₂ O ₃	9 - 18
CaO	33 - 48
MgO	2 - 13
FeO	0,1 - 1
MnO	0,2 - 3
Na ₂ O	0,2 - 1,2
K ₂ O	0,4 - 1,3
SO ₃	0 - 0,2
S ²⁻	0,5 - 1,8

3.2 Reaktionsmechanismen

Hüttensand hat eine ähnliche Wirkung in Beton, wie die Flugasche. Ein deutlicher Unterschied existiert aber bei der Hydratationsgeschwindigkeit, da Hüttensand aufgrund seines vergleichsweise hohen CaO-Gehalts lediglich einen Anreger (Sulfat oder Alkalien) braucht, um ausreichend schnell einen Festigkeitsbeitrag zu liefern. Als idealer Reaktionspartner ist daher der Portlandzementklinker zu nennen. Wobei die Zusammensetzung des Portlandzementklinkers die Reaktionsfähigkeit des Hüttensandes entscheidend beeinflussen kann. So ist bekannt, dass ein hoher C₃S-Gehalt den Festigkeitsbeitrag des Hüttensandes erhöht, während ein hoher C₃A-Gehalt eher festigkeitsverringert [6].

Die Hydratation des Hüttensandglases kann als Korrosion beschrieben werden. In einem ersten Schritt wird das Hüttensandglas ausgelagert, bzw. angelöst. In einem zweiten Schritt bilden sich Sekundärphasen (C-S-H- und C-A-S-H-Phasen, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, AFm- und AFt-Phasen, C_4AH_{13}), die sich nur wenig von den Phasen unterscheiden, die bei der Hydratation eines Portlandzementes entstehen (Abbildung 4).

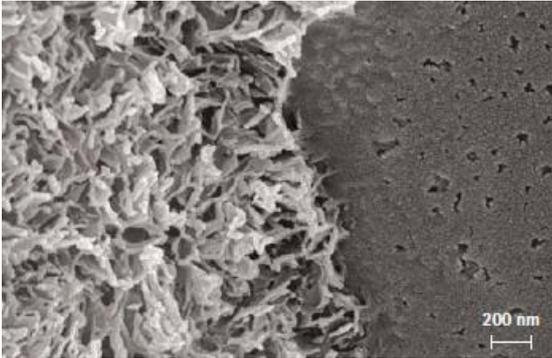


Abb. 4: Hydratisierendes Hüttensandkorn in einem Hochfestzementbeton nach 180 Tagen [4]

4 Wirkung von Flugasche und Hüttensand im Beton

Trotz ihrer unterschiedlichen Herstellungsweise, Kornform und -größe, sowie Zusammensetzung wirkt sich der Einsatz von Flugasche oder Hüttensand in ähnlicher Weise auf die Betoneigenschaften aus.

4.1 Frischbeton

Werden Portlandzement Zusatzstoffe, wie Flugasche und Hüttensand zugegeben, wirken diese zum einen wie bereits erwähnt als Füller. Hierbei sind die Kornform und die Kornverteilung/Kornfeinheit der Zusatzstoffe zu berücksichtigen. Flugasche setzt sich aus kugeligen Partikeln verschiedener Größe zusammen, die in etwa die Feinheit des Portlandzementes aufweisen. Hüttensand ist demgegenüber ein gebrochenes, splittiges Material. Je nachdem wirken sich die Betonzusatzstoffe auf die Packungsdichte als auch die Verarbeitbarkeit aus. Darüber hinaus wirken Betonzusatzstoffe als Keimbildner, die die Zementhydratation im frühen Stadium beschleunigen können. Diese passiven Eigenschaften können aber auch durch die Zugabe chemisch weitgehend inerte, fein gemahlener Stoffe erzielt werden, wie z.B. Kalksteinmehl.

Einen zusätzlichen Beitrag liefern die beiden Stoffe aufgrund ihrer latent-hydraulischen bzw. puzzolanischen Eigenschaften. Bindemittel, die Flugasche oder Hüttensand enthalten, erhärten deutlich langsamer als herkömmlicher Portlandzement. (Hydratationsgeschwindigkeit: CEM I > HÜS > FA). Das bedeutet, dass Betone mit diesen Bindemittelkom-

ponenten länger verarbeitbar bleiben, aber auch nachbehandlungsempfindlicher sind. Aufgrund der langsamen Hydratationsreaktion und einer gleichzeitig verringerten Klinkermenge tritt eine verringerte Hydratationswärmeentwicklung auf, die gerade bei massigen Bauteilen relevante Vorteile bringt. Ein weiterer Aspekt der langsamen Hydratation, ist die hohe Nacherhärtung dieser Bindemittel (Abbildung 5).

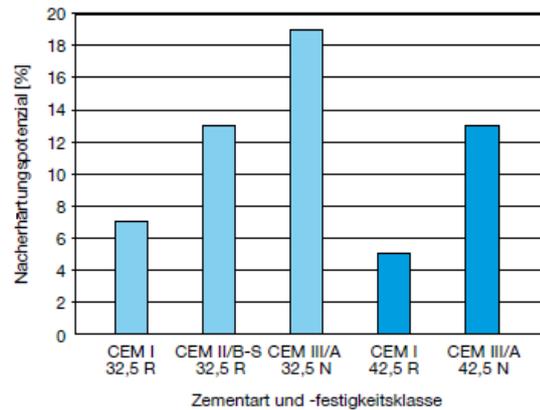


Abb. 5: Nacherhärtung verschiedener Betone von einem Alter von 28 Tagen auf 56 Tage in Abhängigkeit von der Zementart [7]

4.2 Festbeton

Nachdem das Bindemittel erhärtet ist, zeigen sich weitere Einflüsse der Zusatzstoffe Flugasche und Hüttensand auf das gesamte System. Der Einsatz von vor allem puzzolanischen Bindemitteln wirkt sich auf das Porensystem und die Kontaktzone zwischen Gesteinskörnung und Zementsteinmatrix aus.

Gerade die Verringerung der Kapillarporosität und die Unterbrechung des Kapillarporensystems haben weitreichende Folgen für die Dauerhaftigkeitseigenschaften von Beton.

Um diese Veränderungen herbeizuführen geht man davon aus, dass mindestens 65 M.-% Zement durch Hüttensand oder 20 - 30 M.-% Zement durch Flugasche ausgetauscht werden müssen.

Mit zunehmendem Austauschgrad vergrößert sich zwar die Gesamtporosität, allerdings ist der Anteil an feinen Poren ebenfalls erhöht. Der transportrelevante Kapillarporenraum wird zugunsten des Gelporenraumes verringert [8]. Zudem kommt ein weiterer Effekt, der sogenannte „pore blocking effect“ hinzu [9]. Reaktionsprodukte der puzzolanischen oder latent hydraulischen Hydratation setzen sich bevorzugt im Bereich der Poreneingänge und -kanäle fest und begrenzen die Zugänglichkeit für Flüssigkeiten oder Gase.

Auch die Ausbildung einer dichteren Kontaktzone zwischen Gesteinskörnung und Bindemittelmatrix führt zu einer Homogenisierung und

Verdichtung des Betons. Transportvorgänge werden verlangsamt und der Widerstand gegen Ionentransport von außen, aber auch innerhalb der Matrix, wird erhöht. Somit zeigen flugasche- oder hüttensandhaltige Betone auch einen höheren Widerstand gegenüber Dauerhaftigkeitsproblemen, wie der Alkali-Kieselsäure-Reaktion, einem Sulfat- oder Chloridangriff.

5 Große Zusatzstoffmengen in Beton

Im Zuge der Reduzierung der CO₂-Emissionen gehen die aktuellen Entwicklungen dazu über Portlandzementklinker durch hohe Gehalte an Zusatzstoffen, wie z.B. Flugasche oder Hüttensand auch über die Vorgaben der Norm hinaus zu ersetzen. In diesem Zusammenhang sind auch die sogenannten CEM X Zemente zu nennen, die zur Normung anstehen. Hierbei soll beispielsweise der Klinker zu 50% oder mehr durch eine Kombination von Hüttensand und Kalksteinmehl ausgetauscht werden [10]. Auch erweiterte Kombinationen von Steinkohlenflugasche und Hüttensand als Klinkersubstitut werden für den Bereich künftiger Normzemente untersucht [11].

5.1 Flugaschereiche Betone

Ziel eigener Untersuchungen war es, praxisgerechte, flugaschereiche Betone zu konzipieren und bis zu 60 M.-% des Zements durch Flugasche auszutauschen [12]. Die zu entwickelnden flugaschereichen Betone sollten gegenüber einem herkömmlichen Beton der Festigkeitsklasse C20/25 ohne Flugasche sowohl bei der Verarbeitbarkeit, als auch im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit keine Einschränkungen haben. Neben der Konsistenzklasse F3 sollten insbesondere auch fließfähige Konsistenzen der Klassen F5 bis F6 mit Hilfe von PCE-Fließmitteln erreicht werden.

Untersuchungen an Mörteln zeigten erwartungsgemäß, dass der erzielbare Verflüssigungseffekt von den Bestandteilen des Bindemittels – Zement und Flugasche – und der Fließmittelsorte abhängig ist. Die Fließmittelart (Abbildung 6) und die Dosierungsmengen der Fließmittel wirkten sich teilweise verzögernd die Frühfestigkeiten der Mörtel aus.

Betone mit 50 M.-% Zementaustausch durch Flugasche konnten die angestrebte Festigkeitsklasse C20/25 erreichen. Diese Festigkeitsklasse konnte auch bei einem Zementaustausch von 60 M.-% Flugasche durch ein Verringern des w/b-Wertes auf 0,40 erreicht werden. Zwar waren die Werte, die nach 28 d gemessen wurden, entsprechend der Zielvorgaben, jedoch wurden relativ niedrige Frühfestigkeiten festgestellt (Abbildung 7), was in der Praxis z.B. zu einer Verlängerung der Ausschulfristen führen kann. Dieses Problem könnte durch den Einsatz anderer, weniger verzögernder Fließmittel gelöst werden.

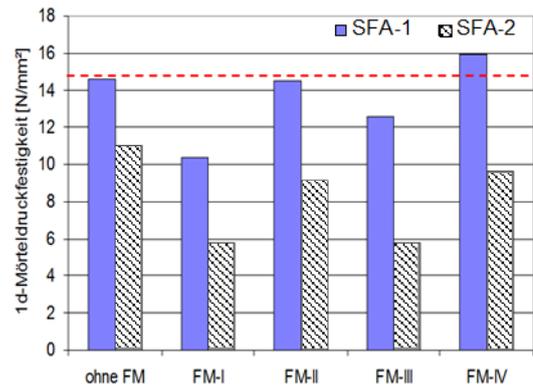


Abb. 6: Einfluss des Fließmittels auf die 1d Druckfestigkeit; w/b = 0, 40, 50 M.-% Flugasche, Fließmittelgehalt: 0,15 M.-%

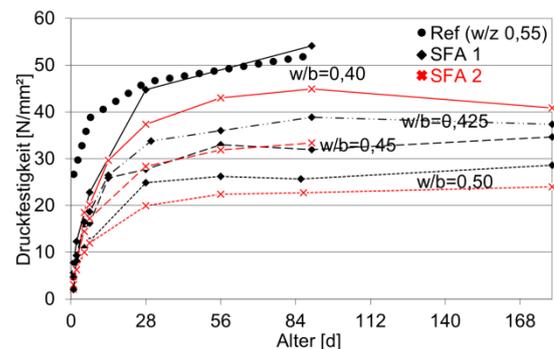


Abb. 7: Entwicklung der Druckfestigkeit bei einem Zementaustausch (CEM I 42,5 R) durch 60 M.-% Flugasche, Leimvolumen Flugaschebeton $300 \pm 5 \text{ l/m}^3$

Die Festigkeiten der Betone nahmen erwartungsgemäß mit abnehmendem w/b-Wert zu. Das 28 d-Festigkeitsniveau der Betone mit 60 M.-% Zementaustausch durch Flugasche und einem w/b-Wert von 0,40 war mit dem des Referenzbetons ohne Flugasche mit einem w/b-Wert von 0,55 vergleichbar (Abbildung 7). Eine für die Praxis maßgebliche Frühfestigkeit von 10 N/mm² nach 12 Stunden wurde bei 50 M.-% Flugaschegehalt nach 48 Stunden und bei 60 M.-% Flugasche nach zwei bis vier Tagen erreicht.

Innerhalb dieses Forschungsprojektes wurden auch Dauerhaftigkeitseigenschaften wie Frost-Tau- und Carbonatisierungswiderstand geprüft.

Mittels CIF-Frostprüfung wurde ermittelt, ob Betone mit 50 und 60 M.-% Flugasche im Bindemittel die Anforderungen an die Expositionsklasse XF3 erfüllen. Die sieben untersuchten Betone mit verschiedenen Zementen und Flugaschen und mit 50 M.-% Zementaustausch durch Flugasche bestanden mit einer Ausnahme diese Frost-Tau-Prüfung (Abbildung 8). Ein Beton, in dem ein Zement mit niedrigem Alkaligehalt zum Einsatz kam, bestand die Prüfung nicht. Durch die Absenkung des

w/b-Wertes auf 0,35 bzw. 0,40 konnte der Frostwiderstand dieser Betonmischung ebenfalls auf Anforderungsniveau erhöht werden.

Der Frostwiderstand der Betone mit 60 M.-% Zementaustausch ist erwartungsgemäß ebenfalls von der Alkalität des eingesetzten Zements abhängig. Die Betone mit einem alkaliarmen Zement bestanden ebenfalls die Prüfung nicht, wobei Beton mit alkalireicheren Zementen frostbeständig war. Dieses Ergebnis lässt sich auf die Anregung und damit die Beschleunigung der puzzolanischen Reaktion der Flugasche durch Zemente mit höherem Alkaligehalt zurückführen.

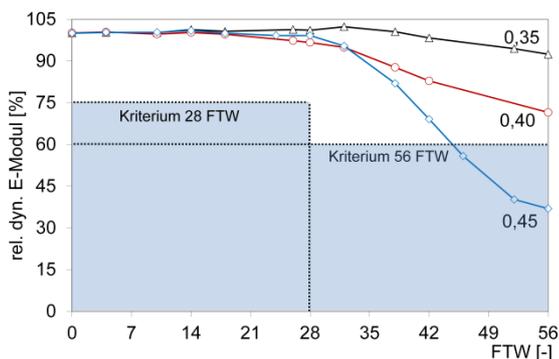


Abb. 8: Einfluss des w/b-Wertes auf die CIF-Frostprüfung bei einem Zementaustausch durch 50 M.-% Flugasche mit einem Zement mit niedrigem Alkaligehalt

Der Carbonatisierungsfortschritt der flugaschereichen Betone mit einem w/b-Wert von 0,45 liegen bis auf eine Ausnahme (NA-Zement) jeweils im Bereich des Carbonatisierungsfortschritts von normgerecht zusammengesetzten Betonen mit Zementen der Zusammensetzung CEM I bis CEM III/B, die gemäß Norm für alle Expositionsklassen mit der Gefahr carbonatisierungsinduzierter Bewehrungskorrosion verwendet werden dürfen.

Zudem zeigen die flugaschereichen Betone mit 60 M.-% Flugasche im Bindemittel kein außergewöhnliches, von Normalbeton abweichendes, Schwindverhalten.

Untersuchungen zum Chloridmigrationskoeffizienten (D_{RCM}) und von spezifischen Elektrolytwiderständen der Betone mit 60 M.-% Flugasche weisen auf einen ausreichenden Korrosionsschutz der Bewehrung bei Chlorideinwirkung im fortgeschrittenem Alter (> 90 d) hin.

Somit lässt sich schlussfolgern, dass hohe Flugaschemengen mit Hilfe von Hochleistungsfließmitteln, die die Verarbeitbarkeit bei niedrigen w/b-Werten gewährleisten, in Beton eingesetzt werden können. Die 28-Tage-Festigkeiten eines herkömmlichen C20/25 werden erreicht. Allerdings sind Abschlüsse in der Frühfestigkeit hinzunehmen, die

längere Ausschulfristen und eine gründlichere Nachbehandlung erfordern. Die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit (Frost-Tau-Widerstand, Karbonatisierung, Chloridmigration) werden bei einem Zementaustausch mit 50 M.-% Flugasche eingehalten.

5.2 Hüttensandreiche Betone

Gegenüber hohen Flugaschemengen im Beton sind hohe Hüttensandgehalte bereits in den Normen verankert. Gemäß DIN EN 197-1 ist es möglich Zementklinker bis zu 95 M.-% durch Hüttensand auszutauschen. Mit steigenden Austauschmengen wirken sich jedoch Qualitätsschwankungen des Hüttensandes immer stärker auf die Eigenschaften des damit hergestellten Zementes aus. Daher ist in diesen Fällen besonders auf eine Vergleichmäßigung des verwendeten Hüttensandes, der Menge und Zusammensetzung des Sulfatträgers und die Feinheit des Zementes zu achten. [13]

Ebenso sind bei der Betonherstellung mit Hochofenzementen mit einem Hüttensandanteil von über 80 M.-% (CEM III/C) Beschränkungen in der Dauerhaftigkeit zu beachten. Der Nachweis der Eignung wird über allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen über das DIBt geregelt.

Hüttensand(-mehl) als Betonzusatzstoff nach DIN EN 15167 wird in Deutschland so gut wie nicht eingesetzt [14]. Zum aktuellen Zeitpunkt gibt es nur eine bauaufsichtliche Zulassung für Hüttensandmehl. Im Gegensatz dazu stieg in anderen europäischen Ländern (z.B. Großbritannien) sowie den USA in den letzten Jahren der Einsatz von Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff an bzw. bewegt sich traditionell auf hohem Niveau.

5.3 Betone mit mehrkomponentigen Bindemitteln

Gegenstand aktueller Forschung sind Untersuchungen zu mehrkomponentigen Bindemitteln, d.h. zum einen CEM II M-Zemente, die über die DIN EN 197 geregelt werden, zum anderen wird auch zu den sogenannten CEM II/C und den CEM X-Zementen geforscht, die mit einer Zusammensetzung von mehr als 35% Hauptbestandteilen neben dem Portlandzementklinker zum Teil außerhalb der Vorgaben der gültigen DIN EN 197 liegen.

5.3.1 Flugasche-Hüttensand-Kombinationen

Am FEHS und dem VDZ wurde in den letzten Jahren intensiv zu Zementen mit Flugasche-Hüttensand-Kombinationen geforscht. Ziel war es die Möglichkeiten und Grenzen von Zementen mit kombiniertem Hüttensand- und Steinkohlenflugasche-Einsatz aufzuzeigen und expositionsbezogene Anwendungskriterien zu erarbeiten.

Es konnte anhand der Forschungsergebnisse belegt werden, dass eine Vielzahl an Zusammensetzungen einer solchen Kombination möglich sind - auch außerhalb der Norm. Kriterium ist hier, den Gehalt an Flugasche bei Zementen mit Klinkergehalten von 40 - 65 M.-% auf maximal 30 M.-% zu begrenzen [15]. Frisch- und Festbetoneigenschaften (Abbildung 9) sowie das Carbonatisierungsverhalten entsprechen vergleichbar zusammengesetzten Betonen mit Zementen nach DIN EN 197-1. Weiterführende Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit - Karbonatisierung, Chloridmigration, Frost-Widerstand, Sulfatangriff - zeigten, dass die Mindestanforderungen an den Beton, entsprechend der jeweiligen Expositions-klasse, mit den ausgewählten Ausgangsstoffen und bei entsprechender Aufmahlung der Zemente bzw. von deren Komponenten, eingehalten werden können [11].

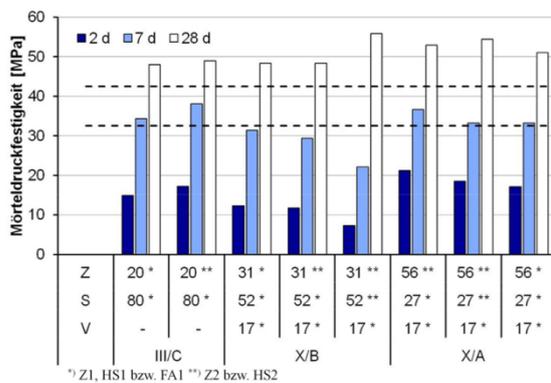


Abb. 9: Festigkeitsentwicklung von ausgewählten Zementzusammensetzungen [15]

5.3.2 Hüttensand-Kalksteinmehl-Kombinationen

Neben den vorher genannten Untersuchungen gibt es auch Bestrebungen, das System Hüttensand-Kalksteinmehl-Klinker bei hohen Klinkeraustauschraten (> 50%) genauer zu betrachten.

In einem Kooperationsprojekt des VDZ mit der TU Darmstadt und der Spenner Zement GmbH & Co. KG [16] wurden Zemente hergestellt, in denen bis zu 30 M.-% Hüttensand und bis zu 50 M.-% Kalkstein als Hauptbestandteil verwendet wurden. Die Untersuchungen ergaben, dass die Frischbetoneigenschaften, die mechanischen Eigenschaften und die Dauerhaftigkeit dieser Zemente, mit Ausnahme des Frost-Tausalz-Widerstandes, weitestgehend denen üblicher Betone mit CEM I oder CEM II/A-LL-Zementen entsprachen (Abbildung 10).

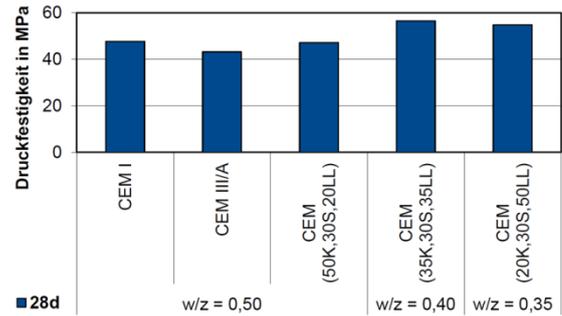


Abb. 10: 28-Tage-Druckfestigkeit von LP-Betonen mit einem konstanten Leimgehalt von $290 \pm 5 \text{ l/m}^3$, $z=320-390$, $w/z=0,50-0,35$, $LP=4,5 \pm 0,5$ [16]

Beschränkendes Kriterium ist hier der w/z-Wert, der bei hohen Klinkeraustauschraten auf 0,35 abgesenkt werden muss, um die Anforderungen zu erfüllen. Zur Sicherstellung einer ausreichenden Verarbeitbarkeit wird empfohlen, den Leimgehalt zu optimieren, die Zementhauptbestandteile genau aufeinander abzustimmen (chemisch-mineralogisch und granulometrisch) und Betonzusatzmittel zuzugeben. [16]

5.3.3 Gezielte Kombination von Zementhauptbestandteilen

Die Entwicklung leistungsfähiger Betone mit klinkerarmen Bindemitteln hat signifikante ökologische und ökonomische Vorteile für die Baustoffindustrie und die Volkswirtschaft.

Besonders vorteilhaft erscheint dabei der Einsatz kalksteinmehlhaltiger Bindemittel, da Kalksteinmehl in der jeweils erforderlichen Menge verfügbar gemacht werden kann.

Diese Bindemittel auf Basis von Portlandzementklinker mit einem Kalksteinanteil über 50% liegen allerdings, wie bereits erwähnt, an den Grenzen und Erfahrungen der heutigen Technologie und können nur mit Kenntnis der maßgebenden physikalischen und chemischen Vorgänge, welche die Entwicklung des festen Gefüges aus dem dichtgepackten Bindemittelleim steuern, erreicht werden.

Kalksteinmehl wird im Allgemeinen als inerter Betonzusatzstoff gesehen, der lediglich den physikalischen Effekt der Füllerwirkung einbringt. Es besitzt aber auch eine gewisse chemische Reaktivität. Durch die Reaktion der Klinkerphasen und der Sulfate aus dem Carbonat des Kalksteinmehls entsteht Monocarbonat im Gegensatz zu Monosulfat und dadurch

zusätzlich Ettringit. Dieser wird dadurch indirekt stabilisiert [17]. Röntgenographische Untersuchungen und thermodynamische Simulationen (GEMS) von Antoni et al. [18] zeigen, dass die Reaktion von CaCO_3 mit Aluminium aus Metakaolin zur Bildung von zusätzlichen karbonathaltigen Monophasen (AFm) führt. Somit ist es möglich Bindemittel mit hohen Kalksteinmehlgehalten weiter zu optimieren.

Steinkohlenflugasche ist, wie der Metakaolin, ein puzzolanisches, aluminiumhaltiges Material. Neben der Verdichtung des Gefüges durch die puzzolanische Reaktion wird erwartet, dass Keimbildungseffekte ebenfalls begünstigt werden und, über den Aluminiumgehalt, der chemische Umsatz des Kalksteinmehls erhöht wird (Abbildung 11).

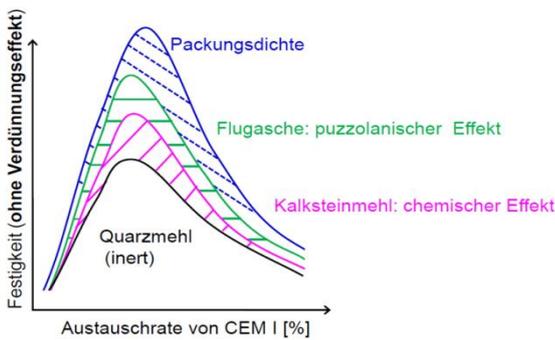


Abb. 11: Skizze zu den Einflussmöglichkeiten verschiedener Zusatzstoffe auf die Festigkeit

Ziel eines neuen Forschungsvorhabens am cbm der TU München soll sein, die wissenschaftlichen Grundlagen für die künftige Herstellung kalksteinreicher klinkerarmer Bindemittel (>50% KSM) für leistungsfähige klinkerarme Betone (Klinker 100 kg/m^3) zu erweitern.

6 Künftige Verfügbarkeit von Flugasche und Hüttensand

Die Bemühungen CO_2 -Emissionen zu verringern, beeinflussen nicht nur die Klinkerproduktion und Zementherstellung, sondern auch die Verfügbarkeit von industriellen Sekundärrohstoffen, wie Flugasche oder Hüttensand. Beide Produkte entstehen bekanntermaßen bei energieintensiven Prozessen.

6.1 Zukunft Steinkohlenflugasche

Wie der Name Steinkohlenflugasche schon sagt, ist der Ausgangsstoff dieses puzzolanischen Materials fossile Steinkohle. Bei der Strom- und Wärmeerzeugung sind im Jahr 2004 allein in Deutschland ca. 4,5 Mio t angefallen (Abbildung 12). Seit 2006 sinken die Produktionsmengen. Im Jahr 2013 waren es noch ca. 3,2 Mio. t [19]. Dies ist auf die im Zuge der Energiewende zurückgefahrenen Kohlekraftwerke zurückzuführen. Bis zum Jahr 2035 wird heute ein Rückgang der Steinkohlenflugascheproduktion in Deutschland auf ca. 2,2 Mio. t prognostiziert [19].

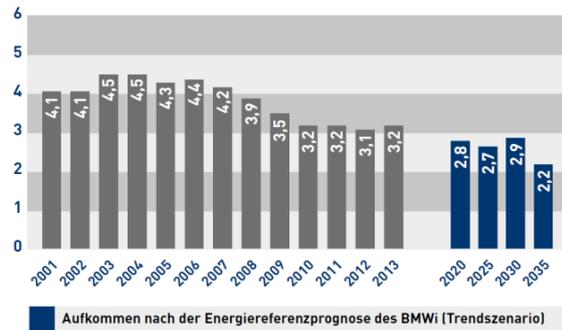


Abb. 12: Produktionsmengen von Steinkohlenflugaschen (ohne konjunkturelle Einflüsse) in Mio. t [19]

Aufgrund der immer größeren Nachfrage an geeigneter Flugasche für den Baustoffsektor klafft künftig hier eine erhebliche Lücke, da schon heute die gesamte anfallende Flugasche in Deutschland bei der Zementherstellung und im Betonbau eingesetzt wird. Um die Nachfrage abzudecken wird der Import von für Betonanwendungen geeigneter Flugasche immer mehr an Bedeutung gewinnen. Der Nachschub an Flugasche gilt mittelfristig als gesichert, da sowohl im inner- als auch im außereuropäischen Ausland die Energieerzeugung über fossile Brennstoffe weiterhin hoch ist und mittelfristig hoch bleibt [20].

6.2 Zukunft Hüttensand

Auch die Verfügbarkeit von Hüttensand hängt aufgrund seiner Herstellung direkt mit der Stahlerzeugung in Deutschland zusammen. Diese ist wiederum gekoppelt an die weltweite Nachfrage und die Weltstahlproduktion. Die Nachfrage an Stahl und Stahlprodukten wächst stetig, vor allem in China, die auch den Weltstahlmarkt dominieren und hohe Exporte fahren. Mengenmäßig liegen die chinesischen Exporte deutlich über der europäischen Nachfrage [21] und es wird eine weltweite Überkapazität der Produktionsanlagen berichtet. Zudem verschärfen die neuen EU-Rahmenbedingungen zur Reduktion der CO_2 -Emissionen ebenfalls die Wettbewerbssituation. Dennoch ist das Produktionsniveau seit Mitte der 90er Jahre weitgehend stabil [21].

Dies spiegelt sich in der Gesamtmenge an angefallener Schlacke wider (Abbildung 13). Deutlich zu erkennen ist auch, dass seit Mitte der 90er Jahre die Hüttensandproduktion stetig zunimmt und damit die Menge an kristalliner Hochofenstückschlacke abnimmt. Die Verteilung liegt im Jahr 2016 bei 87% Hüttensand zu 13% Hochofenstückschlacke. Anhand der Daten aus dem FEhS-Report 2017 [22] sowie den Daten des Wirtschaftsverbands Mineralische Nebenprodukte e.V. [19] wurde eine Prognose der zukünftigen Hüttensanderzeugung erstellt. Abbildung 13 zeigt, dass die Hüttensandproduktion mittelfristig auf dem vorhandenen Niveau bleibt,

bei optimistischer Rechnung sogar um etwa 1,2 Mio.t ansteigt. Somit wird aktuellen Prognosen zufolge auch mittelfristig die Verfügbarkeit von Hüttensand auf diesem Level zunächst erhalten bleiben.

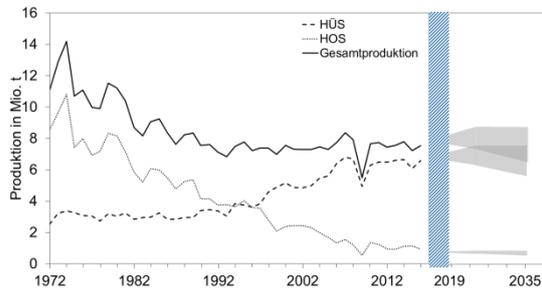


Abb. 13: Produktionsmengen von Hüttensand und Hochofenschlacke in Mio. t

7 Literatur

- [1] DIN EN 450-1, Fly ash for concrete - Part 1: definitions, requirements and conformity criteria. (2005) DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin
- [2] Lutze, D., Vom Berg, W. (2008) Handbuch Flugasche im Beton - Grundlagen der Herstellung und Verwendung. Verlag Bau + Technik, Düsseldorf
- [3] Sybertz, F. (1993) Beurteilung der Wirksamkeit von Steinkohlenflugaschen als Betonzusatzstoff. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 434, Beuth Verlag, Berlin
- [4] Ehrenberg, A. (2006) Hüttensand - Ein leistungsfähiger Baustoff mit Tradition und Zukunft. Betoninformationen, Vol. 4, pp. 35-63
- [5] Locher, F. W. (2000) Zement - Grundlagen der Herstellung und Verwendung. Verlag Bau + Technik, Düsseldorf
- [6] Diamon, M. (1983) Granulated blast-furnace slag in Portland blast-furnace slag cement. J. F. Young, Characterization and Performance Prediction of Cement and Concrete, pp. 155-164
- [7] Bilgeri, P., Eickschen, E., Felsch, K., Klaus, I., Vogel, P., Rendchen, K. (2007) Verwendung von CEM II- und CEM III-Zementen in Fahrbahndeckenbeton. Betoninformationen, Vol. 2, pp. 15-31
- [8] Hårdtl, R. (1995) Veränderung des Betongefüges durch die Wirkung von Steinkohlenflugasche und ihr Einfluß auf die Betoneigenschaften. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 448, Beuth Verlag, Berlin
- [9] Marsh, B. K., Day, R. L., Bonner, D. G. (1985) Pore structure characteristics affecting the permeability of cement paste containing fly ash. Cement and Concrete Research, Vol. 15, pp. 1027-1038
- [10] Müller, C., Severins, K., Hauer, B. (2010) New findings concerning the performance of cements containing limestone, granulated blastfurnace slag and fly ash as main constituents. Cement International, Vol. 3&4
- [11] Feldrappe, V., Ehrenberg, A. (2017) Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen mit Hüttensand- und flugaschereichen Zementen. Report der FEhS-Instituts 2/2017
- [12] Heinz, D., Urbonas, L., Göbel, M., Schubert, J. (2011) Praxisgerechte flugaschereiche Betone mit Hochleistungsfließmitteln. Betonwerk International, Vol. 5, pp. 2-11
- [13] Sachstandsbericht (2007) Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff - Sachstand und Szenarien für die Anwendung in Deutschland. Schriftenreihe des Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 569, Berlin
- [14] Ehrenberg, A. (2010) Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff - Aktuelle Situation in Deutschland und Europa. Betoninformationen, Vol. 3, pp. 48-63
- [15] Feldrappe, V., Ehrenberg, A. (2012) CEM X Zemente - Optimierte Zemente mit Hüttensand, Steinkohlenflugasche und Klinker. Report des FEhS-Instituts
- [16] Müller, C., Palm, S., Severins, K., Graubner, C.-A., Proske, T., Rezvani, M., Neufert, W., Reuken, I., Weber, G. (2016) Erforschung des Dreistoffgemisches Klinker, Hüttensand und Kalksteinmehl mit dem Ziel der Absenkung des Klinkeranteils im Zement zur Verminderung der CO²-Emissionen in der Zementproduktion. Abschlussbericht Deutsche Bundesstiftung Umwelt
- [17] De Weerd, K., Haha, M. B., Le Saout, G., Kjellsen, K. O., Justnes, H., Lothenbach, B. (2011) Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. Cement and Concrete Research, Vol. 41, pp. 279-291
- [18] Antoni, M., Rossen, J., Martirena, F., Scrivener, K. (2012) Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. Cement and Concrete Research, Vol. 42, pp. 1579-1589

[19] Schwarzkopp, F., Drescher, J., Gorning, M., Blazejczak, J. (2016) Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland. Wirtschaftsverband Mineralische Nebenprodukte e.V.

[20] VGB PowerTech (2012) Facts and figures - electricity generation 2012/2013

[21] Küster Simic, A., Gül, O., Lauenstein, P. (2017) Branchenanalyse Stahlindustrie - Entwicklungstrends und Zukunftschancen. Hans Böckler Stiftung

[22] Merkel, T. (2017) Erzeugung und Nutzung von Eisenhüttenschlacken 2016. Report des FEHS-Instituts

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz

Centrum Baustoffe und Materialprüfung
TU München
Baumbachstraße 7
81245 München

Dr.-Ing. Anne Heisig

Centrum Baustoffe und Materialprüfung
TU München
Baumbachstraße 7
81245 München

Calcinierte Tone und ihr Potenzial für die moderne Betontechnologie

Karl-Christian Thienel und Nancy Beuntner

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag stellt ein sehr leistungsfähiges und zukunftssträchtiges Material vor: Calcinierte Tone. Einführend wird über die Attraktivität calcinierter Tone berichtet, anhand eines mineralogischen Exkurses wird ein Überblick zu dieser Materialgruppe gegeben und die Notwendigkeit einer gezielten thermischen Behandlung sowie grundsätzliche Möglichkeiten der Herstellung calcinierter Tone aufgezeigt. Es folgen ein Überblick ausgewählter physikalischer und chemisch-mineralogischer Eigenschaften und die Darstellung wesentlicher Reaktionsmechanismen. Dabei werden neueste Erkenntnisse zum Einfluss auf die frühe Hydratation vorgestellt. Im anschließenden Abschnitt wird die Wirkung auf Frischbetoneigenschaften und die besondere Rolle der Eigenschaften calcinierter Tone beleuchtet. Untersuchungen zu den Festbetoneigenschaften und ausgewählten Dauerhaftigkeitsaspekten zeigen das Potenzial calcinierter Tone in Betonen auf. Abschließend werden Möglichkeiten und Grenzen eines zukünftigen Einsatzes als Zementzumahlstoff bzw. Betonzusatzstoff bewertet und ökologische Aspekte betrachtet.

1 Motivation

Der Vormarsch der Kompositzemente und der vermehrte Einsatz von Betonzusatzstoffen werden zukünftig die Suche nach innovativen und leistungsfähigen Stoffen verstärken. Dabei spielt auch die ökologisch-ökonomische Optimierung der einzusetzenden Bindemittel eine immer größere Rolle [1-3].

Vor diesem Hintergrund stehen calcinierte Tone vermehrt im Fokus der Baustoffforschung. Sie stellen nach derzeitigem Stand in Wissenschaft und Praxis eine höchst interessante Option dar, um den Klinkerfaktor im Zement im gewünschten Maße zu senken und gleichzeitig die erforderlichen Bindemittel-eigenschaften für Betone zu erreichen bzw. gezielt zu verbessern. Als besonders vielversprechend gelten dabei natürlich vorkommende Tongemische. Diese bestehen mineralogisch aus thermisch aktivierbaren Schichtsilikaten, wie Kaolinit, Illit und Glimmer sowie aus verschiedenen inerten Komponenten (z. B. Quarz, Feldspäte). Solche Tongemische sind weltweit in ausreichender Menge und Qualität verfügbar und zeigen nach einer gezielten thermischen Behandlung (Calcinierung) puzzolane Eigenschaften im Beton, welche auf chemischen und physikalischen Wirkmechanismen beruhen [4].

Erste Forschungsarbeiten an calcinierten Tönen gehen auf Arbeiten von Murat [5-7], Ambroise [8, 9]

und He [10-13] in den 80er und 90er Jahren des letzten Jahrhunderts zurück und betrachten ausgewählte, möglichst reinphasige Schichtsilikate. Der bekannteste Vertreter der calcinierten Tone ist das aus dem Zweischichtsilikat Kaolinit hergestellte Metakaolin. Mit der Erforschung seiner Eigenschaften und Wirkungsweise als Betonzusatzstoff haben sich bereits viele Arbeiten beschäftigt, bspw. [14-18]. Nachteilig ist unter anderem der hohe Preis, der trotz der bekannt guten Leistungsfähigkeit einen breiten Einsatz im Bauwesen verhindert. Gegenwärtig sind unter anderem Tone mit einem hohen Anteil des Dreischichtsilikats Illit Bestandteil weltweiter Forschungen [19-21].

Für die thermische Aktivierung illitischer Tone werden deutlich höhere Temperaturen als für Kaolinit und Tongemische benötigt, was die Attraktivität illitischer Tone beeinträchtigt. Das größte Potenzial bieten aus heutiger Sicht kaolinarme Tongemische mit Kaolinitgehalten im Rohton von ≤ 25 M.-%.

Abbildung 1 zeigt im Überblick die Einordnung calcinierter Tone im Dreistoffdiagramm $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ sowie eine für Zementersatz- bzw. Betonzusatzstoffe (SCM, engl. für supplementary cementitious materials) geeignete Klassifizierung in illitische Tone, kaolinarme Tongemische und kaolinreiche Tone.

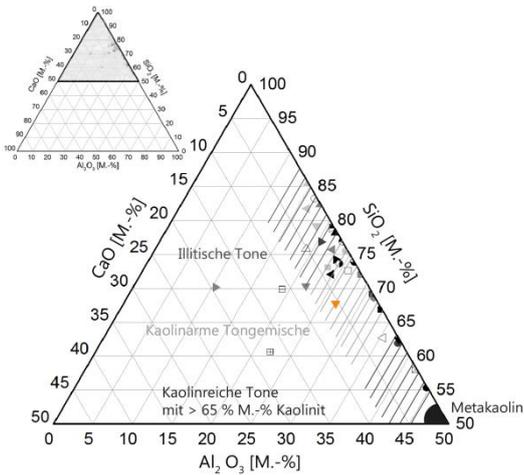


Abb. 1: Überblick zur Zusammensetzung natürlich anstehender Tone im Dreistoffsystem CaO-Al₂O₃-SiO₂ [4]

2 Herstellung und Eigenschaften calcinierter Tone

2.1 Konstitution und thermische Aktivierbarkeit

Tone bestehen nach geologischer Nomenklatur aus Mineralpartikeln kleiner 20 µm und einem silikatischen Tonmineralanteil mit Partikelgrößen kleiner 2 µm [22]. Für die Verwendung als SCM sind Tone mit hohem Schichtsilikatanteil von Bedeutung. Schichtsilikate sind aus Silicium-(SiO₄)-Tetraeder-Schichten und Aluminium-(AlO₆⁻) bzw. Magnesium-(MgO₆⁻) Oktaeder-Schichten aufgebaut und werden nach ihrer Struktur in Zweischichtsilikate (Kaolinit, Serpentin-Gruppe), in Dreischichtsilikate (Glimmer, Illit, Smectit/Montmorillonit) und Vierschichtsilikate (Chlorit-Gruppe) unterschieden [23]. Schichtsilikate kommen in der Natur meist nicht reinphasig vor, sondern enthalten Begleitminerale wie Quarz und Feldspäte. Die Gewinnung und Aufbereitung möglichst reinphasiger Tone ist schwierig und kostenintensiv. Die Verwendung möglichst reinphasiger Tone als SCM ist deshalb baupraktisch uninteressant. Die thermochemische Aktivierbarkeit der Tone ist vom Mineralphasenbestand (Art des Schichtsilikates), der Struktur der Schichtsilikate sowie Gitterstörungen und Fehlordnungen im Kristallgitter abhängig und differiert sehr markant für die natürlich vorkommenden Schichtsilikate.

Beim Calcinieren werden die OH-Banden an den Oktaederschichten abgespalten (Dehydroxylierung). Entsprechend der Schichtsilikat-Struktur erhöht sich die optimale Temperatur für den Dehydroxylierungsprozess von Fe-OH-Banden < Al-OH-Banden < Mg-OH-Banden [23]. Das Zweischichtsilikat Kaolinit weist im Calcinierungsprozess dabei gegenüber den Dreischichtsilikaten eine Besonderheit auf: während Dreischichtsilikate vorrangig

Hydroxylgruppen verlieren und weniger ihren kristallinen Zustand ändern, kann für die Umwandlung von Kaolinit in Metakaolin eine Umordnung der Kristallstruktur in ungeordnete, amorphe Strukturen aufgezeigt werden [24]. Eine etablierte Methodik zur Bestimmung der Calcinierungstemperatur ist die Thermoanalyse [25]. Abbildung 2 zeigt das Entwässerungsverhalten von ausgewählten Schichtsilikaten und einem Tongemisch.

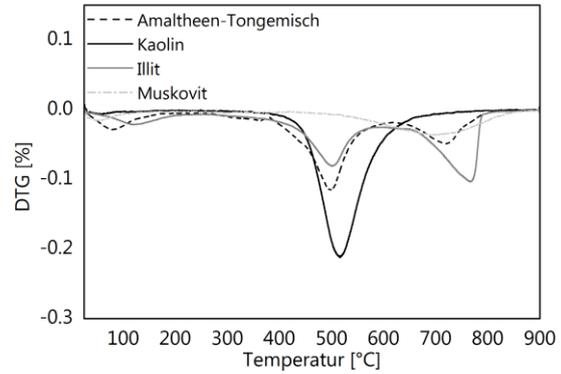


Abb. 2: DTG für ausgewählte Schichtsilikate und einem Tongemisch zur Festlegung der optimalen Calcinierungstemperatur

Im Gegensatz zu etablierten SCM wie Steinkohlenflugasche und Hüttensand werden calcinierte Tone im geeigneten Brenntemperaturbereich zwischen 550 °C und 850 °C unterhalb ihrer jeweiligen Sinter-temperatur aktiviert und nicht aus Schmelzen gewonnen, weshalb sie keine glasigen Partikel aufweisen. Die Morphologie und physikalisch-chemischen Oberflächeneigenschaften (wie Wasserbindevermögen und Adsorptionsverhalten) calcinierter Tone weichen deshalb deutlich von denen bekannter SCM ab und wirken sich signifikant auf die Verarbeitungs- und Frischbetoneigenschaften aus (siehe 2.3.1 und 4). Für calcinierte reinphasige Tone wurde in der Literatur die Bezeichnung Metatone, bspw. Metakaolin, Metallit, Metamuskovit, eingeführt und damit die Calcinierung der Materialien gekennzeichnet.

2.2 Calcinierungsverfahren

Zur Herstellung von Metatonen stehen verschiedene Calcinierungsverfahren zur Verfügung. Der überwiegende Anteil an Forschungsarbeiten, bspw. [7, 26], beruht auf der Verwendung von Ofenaggregaten im Labormaßstab (Muffelofen, Labordrehrohrföfen, Labor-Flash-Calcinierer). Die größte Bedeutung aus baupraktischer Sicht hat perspektivisch die Flash-Calcinierung, die für Metakaolin bereits heute Stand der Technik ist. Bei der Flash-Calcinierung wird Material bis 2 mm Korngröße während einer kurzen Verweilzeit von ein bis zwei Sekunden der Temperatur im Calciner ausgesetzt. Abbildung 3 zeigt eine derartige Anlage [27].

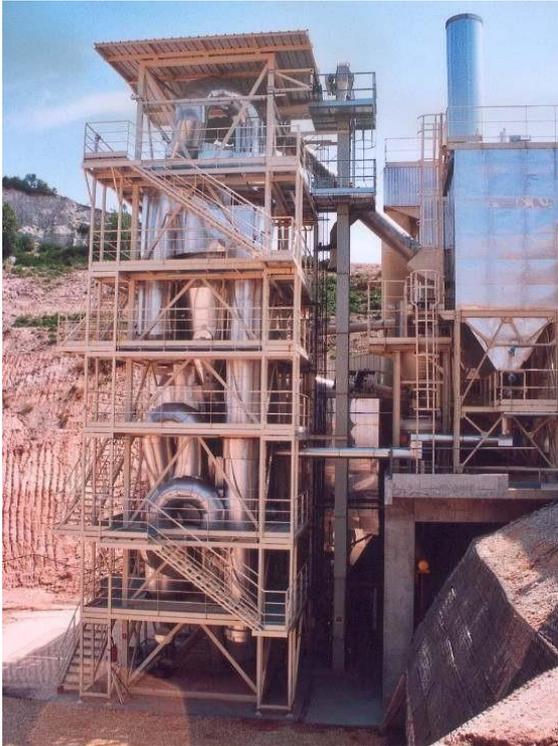


Abb. 3: Anlage eines Flash-Calcinierers, Standort Flume (Frankreich) [27]

Wie Arbeiten von Beuntner und Thienel [28] zeigen, können auch bestehende Anlagen der Industrie genutzt werden, um calcinierte Tone großtechnisch im Drehrohrofen herzustellen (Abbildung 4). Besonders Augenmerk dieser Untersuchung lag auf der Herstellung eines reaktiven calcinierten Tongemisches mit möglichst geringem wirtschaftlichem Aufwand und unter Einhaltung ökologischer Gesichtspunkte. Dafür wurde der Rohstoff vorab nicht gemahlen, sondern die nur grob aufbereiteten Rohgranalien mit Korngrößen von bis zu 100 mm in den Drehrohrofen gegeben. Dem ökologischen Aspekt wurde über eine möglichst geringe, aber effiziente Wahl der Calciniertemperatur unterhalb der Entsäuerung des Kalks Rechnung getragen. Eine geeignete Anlage, welche klassisch für die Blähtonherstellung genutzt wird, ist in Abbildung 4 zu sehen.

Die Herausforderung dieser Technologie liegt in der Sicherstellung einer möglichst gleichmäßigen Dehydroxylierung aller im Tongemisch enthaltenen Schichtsilikate bis in den Kern der Partikel hinein. Als mögliches Kriterium in der Produktionsüberwachung bietet sich die Ermittlung des Glühverlustes an. Dieser liegt für kalkarme Rohstoffe in der Regel zwischen 8 und 12 M.-% und sollte nach dem Calcinieren wie für etablierte SCM beschränkt werden.



Abb. 4: Drehrohrofen, Standort Pautzfeld (Deutschland) [4, 28]

2.3 Eigenschaften calcinierter Tone

2.3.1 Physikalische Eigenschaften

Die physikalischen Eigenschaften calcinierter Tone weichen von denen bekannter SCM ab und zeigen dabei eine große Variation abhängig von ihrer geologischen Herkunft und Zusammensetzung. Tabelle 1 zeigt exemplarisch den Vergleich ausgewählter, für die Betontechnologie bestimmender physikalischer Eigenschaften zwischen calcinierten Tonen, Portlandzement sowie Kalksteinmehl und Steinkohlenflugasche. Die Übersicht macht deutlich, dass alle vier dargestellten calcinierten Tone aufgrund ihrer Schichtstruktur einen signifikant höheren Wasseranspruch und größere spezifische Oberflächen im Vergleich zu Zement und etablierten SCM aufweisen. Jedoch lässt sich kein linearer Zusammenhang zwischen BET-Oberfläche und Wasseranspruch für die calcinierten Tone ableiten. Zudem zeigen aktuelle Untersuchungen an Muskovit [29] im für die Reaktivität als SCM interessanten Calciniertemperaturbereich eine Verringerung der BET-Oberfläche, während gleichzeitig keine Verminderung der Wasseraufnahmefähigkeit mit steigender Brenntemperatur auftritt.

Ein Rückgang des Wasseranspruchs und der spezifischen Oberfläche kann erst mit dem Einsetzen von Sinterungsvorgängen der Schichtsilikate (für Temperaturen $> 900\text{ }^{\circ}\text{C}$) beobachtet werden (Abbildung 5). Für Temperaturen ab $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ nimmt die puzzolane Reaktivität der calcinierten Tonen jedoch signifikant ab (siehe Abbildung 6).

Tab. 1: Exemplarische Darstellung von ausgewählten physikalischen Eigenschaften (Reindichte, Wasseranspruch, spezifische BET-Oberfläche) aus [4, 30, 31]

Bindemittel/SCM	Reindichte [g/cm ³]	BET-Oberfläche [m ² /g]	Wasseranspruch [M.-%]
CEM I 42,5 R	3,1	1,0	24
Kalksteinmehl	2,7	2,0	21
Steinkohlenflugasche	2,3	1,3	20
Meta-Illit	2,7	95	68
Meta-Muskovit	2,8	12	80
Meta-Kaolin	2,4	15	70
calciniertes Tongemisch	2,6	5	39

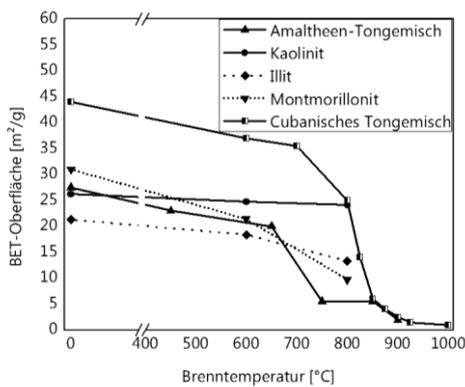


Abb. 5: Spezifische BET-Oberfläche in Abhängigkeit von der Calciniertemperatur [4, 24]

Des Weiteren spielt auch die Granulometrie der calcinierten Tone für die physikalischen Wirkmechanismen im Beton eine ausschlaggebende Rolle. Die positive Wirkung des Füllereffektes und eine verbesserte Packungsdichte der Bindemittelmatrix sind für calcinierte Tone mit Erhöhung der Mahlfineinheit gegeben. Jedoch geht anders als bei konventionellen glasigen SCM, wie Flugasche und Hüttensand, der Verdünnungseffekt proportional zur Austauschrate mit einer Erhöhung des Wasser-Bindemittel-

Verhältnisses einher. Nach He [11] liegt der für die Normkonsistenz erforderliche Wassergehalt in Zement-calcinierter Ton-Gemischen mit Wasser-Bindemittelwerten zwischen 0,55 und 0,80 signifikant über den bekannten Werten für Zementleime.

2.3.2 Chemisch-mineralogische Eigenschaften

Die Bandbreite der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung natürlich vorkommender Tone, welche sich als SCM für Betone eignen, ist enorm vielfältig und variiert zum Teil auch lokal sehr stark. Eine Klassifizierung weltweit verfügbarer Tone, die als SCM interessant sind, ist bislang noch nicht vorhanden. Im wissenschaftlichen Kontext werden, wie bereits in Abb. 1 dargestellt, Tongemische anhand ihres Kaolinit-Gehaltes eingeordnet und reinphasige Tone über das entsprechende Schichtsilikat benannt. Beispielhaft zeigt Tabelle 2 die chemische und mineralogische Zusammensetzung eines (uncalcinierten) Amaltheen-Tongemisches aus Süddeutschland.

Die chemische Zusammensetzung sowie die Mineralogie bestimmen maßgeblich die puzzolanen Eigenschaften calcinierter Tone im Beton. Schon He [11] konnte in seinen Arbeiten eine Verbesserung der puzzolanen Reaktivität von Glimmer < Montmorillonit < Illit < Kaolinit aufzeigen. Äquivalent zur mineralogischen Zusammensetzung ist mit steigendem Anteil an reaktiven Aluminium-Ionen im Verhältnis zum reaktiven Siliciumanteil eine verbesserte Puzzolanität der calcinierten Tone zu erwarten [4, 32, 33]. Das Verhältnis an löslichen Si/Al-Ionen beträgt für annähernd reinphasige Metakaoline rund eins und erhöht sich für Drei- und Vierschichtsilikate auf rund zwei bei gleichzeitiger Abnahme der Reaktivität (Abb. 6).

Tab. 2: Chemisch-mineralogische Zusammensetzung eines Tongemisches am Beispiel des Amaltheen-Tones aus Süddeutschland [4]

Mineralogische Zusammensetzung in [M.-%]		Chemische Zusammensetzung in [M.-%]	
Kaolinit	25	SiO ₂	54,0
Glimmer	30	Al ₂ O ₃	21,4
Illit	11	Fe ₂ O ₃	9,0
Chlorit	6	CaO	4,3
Quarz	18	MgO	2,0
Feldspat	5	SO ₃	2,0
Calcit	3	Na ₂ O _{eq}	3,0
Sulfate	1	Glühverlust	0,86
Pyrit	1	CO ₂	1,9

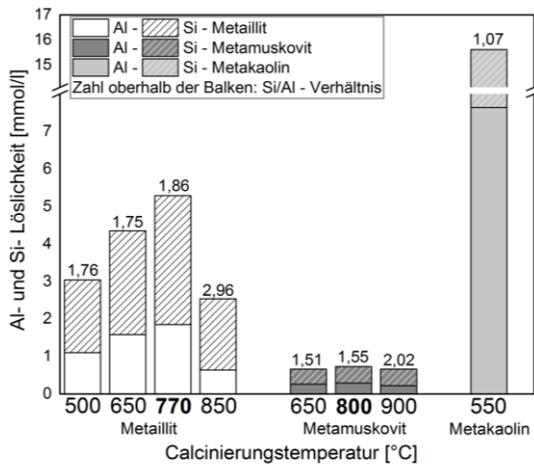


Abb 6. Löslichkeiten und Verhältnis Si/Al mit steigender Calciniertemperatur für verschieden calcinierte Tone [30]

Nach DIN EN 197-1 [34] gilt als Einsatzkriterium für natürliche getemperte Puzzolane (Q) ein Mindestgehalt an reaktiven Siliciumdioxid von ≥ 25 M.-%. Zur Beurteilung der puzzolanen Wirksamkeit im Beton ist gerade für die aluminiumreichen Tone ein erweiterter Ansatz zur Beurteilung der Reaktivität erforderlich. Hier zeigt die Bestimmung der löslichen Aluminium- und Silicium-Ionen, wie sie von Surana [35] oder Buchwald [36] beschrieben wird, sehr hohe Korrelationen mit der puzzolanen Wirksamkeit in Mörteln und Betonen (Abbildung 7).

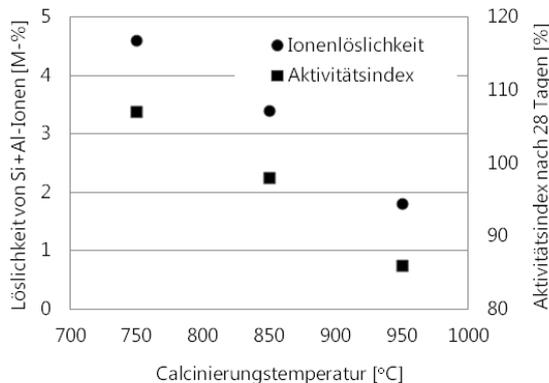


Abb. 7: Ionen-Löslichkeiten und Aktivitätsindex an Mörtelprismen nach 28 Tagen in Abhängigkeit von der Calciniertemperatur eines Amaltheen-Tongemisches [32]

Für die Bewertung der optimalen Brenntemperatur hat sich die Bestimmung des Gehalts an löslichen Ionen und die Ermittlung des Si/Al-Verhältnisses bewährt [32], wobei die Elutionszeit als nicht vernachlässigbarer Parameter beachtet werden muss [4]. Abbildung 6 veranschaulicht für Illit sehr gut das Erreichen der höchsten Puzzolanität bei einer Calciniertemperatur von 770 °C. Bei höheren Brenntemperaturen sinkt die Summe der gelösten Ionen und gleichzeitig steigt das Verhältnis Si/Al

auf circa drei. Dies deutet auf erste Sintereffekte des illitischen Tons hin, welche bei entsprechender Feinheit und durch Flussmittel im Ton (Alkalifeldspäte, Eisenoxid) durchaus schon bei deutlich niedrigeren Brenntemperaturen auftreten können, als dies mitunter in der Literatur angegeben wird. Für die Verwendung calcinierter Tone in Mörtel und Beton als puzzolanen Stoff, müssen sinnvollerweise die Tone unterhalb der Sintertemperatur gebrannt werden, um eine entsprechend hohe Reaktivität sicherzustellen.

Besonderes Interesse sollte auch dem Alkaligehalt calcinierter Tone gelten. Dieser liegt als $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ für Metakaoлин bei kleiner eins und kann sich mit zunehmendem Anteil an Dreischichtsilikaten deutlich erhöhen. Für bisher untersuchte natürlich vorkommende kaolinarme Tongemische wurde ein $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ von rund drei ermittelt. Dieser Aspekt sollte hinsichtlich der Dauerhaftigkeitsbetrachtungen von Beton in zukünftigen wissenschaftlichen Fragestellungen kritisch und tiefgehend diskutiert werden.

3 Reaktionsmechanismen calcinierter Tone

Der wesentliche Reaktionsmechanismus für Puzzolane beruht im klassischen Sinne auf der Bildung von Calcium-Silikat-Hydraten (C-S-H) aus dem Calciumhydroxid (CH) der Porenlösung und aus freigesetzten, reaktiven Silicium-Ionen aus den puzzolanen Stoffen. Für sowohl silicium- als auch aluminiumreiche SCM puzzolanen Charakters ist dieser Reaktionsmechanismus um die Bildung von AFm-Monophasen, vor allem sogenannter Carboaluminat zu erweitern [4, 37]. Die puzzolane Reaktivität calcinierter Tone wird von der Menge und dem Verhältnis Si/Al sowie der Löslichkeitsrate an Al- und Si-Ionen geprägt. Diese werden beeinflusst vom jeweiligen Schichtsilikat und dessen mengenmäßigem Anteil im Tongemisch, vom Dehydroxyierungsgrad nach der Calciniertemperatur und von der Feinheit der calcinierten Tone. Bereits in der frühen Phase der Hydratation ist für hochreaktive Schichtsilikate mit entsprechender Al- und Si-Ionenlöslichkeit eine eigenständige Bildung von Hydratphasen nachweisbar [30, 33]. Dabei interagieren die calcinierten Tone sehr stark mit den Ionen der Porenlösung wie vor allem den Sulfaten und Carbonaten unter Bildung von Ettringit (AFt-Phase) und Carboaluminaten (AFm-Phase) sowie mit Calciumhydroxid unter Bildung von Calcium-Silikat-Hydraten (C-S-H-Phasen). Bereits Murat [6] zeigte am Beispiel Metakaoлин (AS_2) die Bildung silikatischer (C-S-H) und aluminatischer (C-A-H) Hydratphasen in Abhängigkeit vom Portlanditangebot. Mit sinkendem Portlanditangebot wird die Bildung von AFm-Monophasen begünstigt. Übereinstimmend zeigt sich in der Literatur, bspw. in [6, 11] die Bildung der

AFm-Phase Strätlingit (C_2ASH_8) nach circa sieben Tagen Hydratation bei einem Feststoffverhältnis AS_2/CH von 1/1. Neuere Untersuchungen von Beuntner [4, 33] und Scherb et al. [30] bestätigen inner-halb der ersten 24 Stunden der Hydratation bei entsprechendem Sulfatangebot eine verstärkte Ettringitbildung (AFt-Phase) in klinkerfreien Modellsystemen, welche aus alkalischen Lösungen unter Zugabe von CH und Sulfaten bzw. Carbonaten bestehen. Die puzzolane Reaktion calcinierter Tone setzt somit auch in Mörteln und Betonen deutlich früher ein, als es für SCM im Allgemeinen beschrieben wird. In der frühen Hydratation nehmen calcinierte Tone signifikant Einfluss auf die aluminatische Klinkerreaktion über eine ausgeprägte AFt-AFm-Phasenbildung (Abbildung. 8) [4]. Auch im weiteren Hydratationsverlauf zeigt sich mit zunehmendem Gehalt an reaktiven Aluminium-Ionen im Bindemittelgemisch eine stark favorisierte AFm-Phasenbildung gegenüber den C-S-H-Phasen.

Die Hauptphase der puzzolanen Reaktion findet zwischen sieben und 28 Tagen statt und ist dann auch über einen deutlichen Festigkeitsbeitrag in Mörtel und Betonen belegbar. Die dabei nachweisbare, deutliche Portlandit-Bindung basiert wesentlich auf der Bildung von AFm-Phasen und nicht, wie häufig unzutreffend beschrieben, ausschließlich auf der Bildung der silikatischen C-S-H-Phasen.

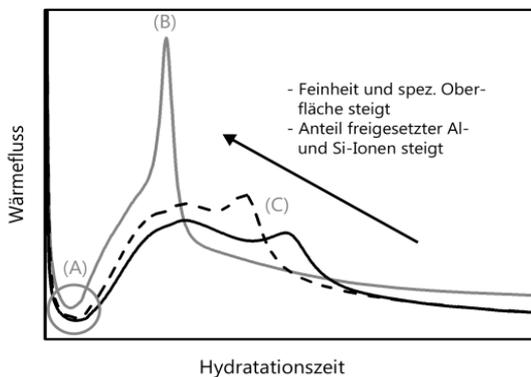


Abb. 8: Schematische Darstellung zum Einfluss calcinierter Tone auf die Reaktionskinetik im Zement [4], mit
 (A) verstärkter Ettringitbildung während der Ruheperiode von Zement,
 (B) Überlagerung der aluminatischen und silikatischen Klinkerreaktion in metakaolinhaltigen Mischungen und
 (C) bevorzugter AFm-Phasenbildung und verzögerter Portlandit-Freisetzung in Mischungen mit calcinierten Tongemisch

Calcinierte Tone beeinflussen die frühe Hydratationskinetik von Zementen folglich nicht nur durch physikalische Effekte (Füller- und Keimbildungseffekte) sondern auch maßgeblich über ihre chemische Reaktivität.

4 Frisch- und Festbetoneigenschaften von Betonen mit calcinierten Tonen

4.1 Frischbetoneigenschaften

Die Frischbetoneigenschaften von Mörteln und Betonen unter Zusatz calcinierter Tone werden entscheidend durch die physikalischen Eigenschaften der calcinierter Tone geprägt. Der deutlich höhere Wasseranspruch beeinflusst signifikant die Verarbeitbarkeit und erfordert wirkungsvolle Fließmittel. Zur Wechselwirkung von Fließmitteln mit calcinierten Tonen werden gerade in einem laufenden DFG-Forschungsvorhaben (PL 472/11-1 und TH 1383/3-1) systematische Untersuchungen durchgeführt, um insbesondere für höhere Substitutionsraten an calcinierten Ton im Beton Lösungsansätze für die Praxis aufzeigen zu können. Nach ersten Ergebnissen [38] können selbst weitgehend reine calcinierte Tone aufgrund ihrer heterogenen Oberflächenladung mit Polycarboxylatethern (PCE) hoher anionischer Ladungsdichte als auch mit kationischen Polymeren in zementären Systemen ausreichend verflüssigt werden.

Mit calcinierten Tongemischen sind die Auswirkungen auf die rheologischen Eigenschaften aufgrund ihres Anteils an Nebenbestandteilen (Quarz, Feldspat, Eisenoxiden) von rund 30 M.-% als weniger kritisch einzustufen. Thienel [39] konnte in Betonen mit einem calcinierten Amaltheen-Tongemisch eine Verringerung der Ausgangskonsistenz in den ersten fünf Minuten nach Wasserzugabe entsprechend des Wasseranspruches feststellen (Abb. 9). Im weiteren Verlauf bis 45 Minuten war der nachfolgende Konsistenzverlust der Betone mit calcinierten Ton etwas geringer als für den Referenzbeton. Die Verarbeitbarkeit scheint damit nach erfolgreicher Einstellung der Ausgangskonsistenz für calcinierte Tongemische beherrschbar zu sein.

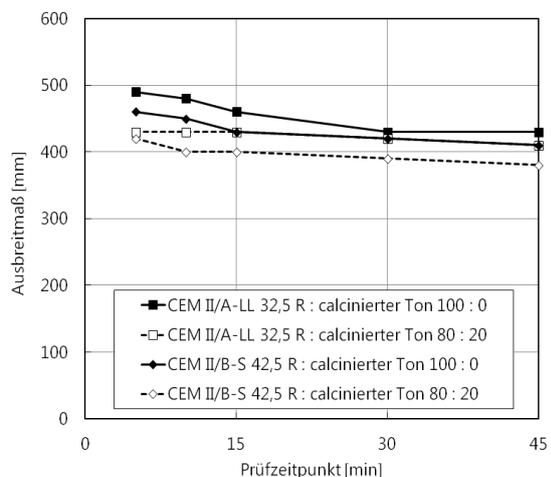


Abb. 9: Einfluss des calcinierten Tongemisches auf das Ausbreitmaß von Beton [39]

Der erhöhte Wasseranspruch calcinierter Tone kann jedoch für baupraktische Fragestellungen auch durchaus interessant sein. Betone mit calcinierten Tonen verfügen über ein verbessertes Wasserrückhaltevermögen [39]. Als Kriterium wurde das Wasserabsondern des Frischbetons nach DBV-Merkblatt [41] herangezogen. Abbildung 10 zeigt für drei unterschiedliche Betone eine verminderte Blutneigung durch die partielle Substitution von Zement gegen 20 M.-% calcinierten Ton.

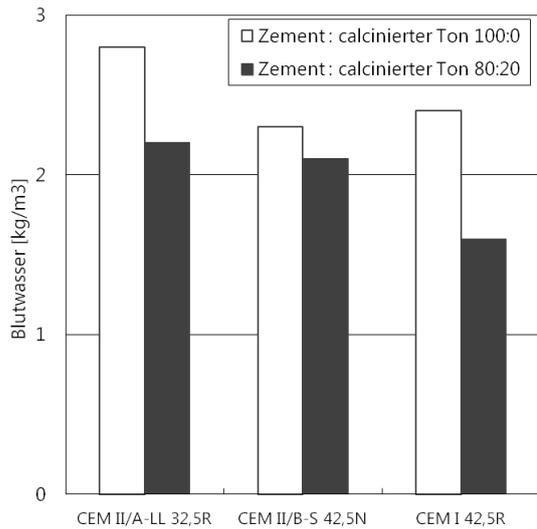


Abb. 10: Einfluss des calcinierten Tongemisches auf die Blutwassermenge von Frischbeton [39]

4.2 Festbetoneigenschaften und Dauerhaftigkeit von Beton mit calcinierten Tonen

Der Einsatz calcinierter Tone führt je nach Reaktivität und Betonzusammensetzung (Zementwahl, w/b-Wert) zu einem deutlichen Festigkeitsbeitrag zwischen sieben und 28 Tagen [18, 39]. Dies ist auf die puzzolanen Wirkmechanismen calcinierter Tone zurückzuführen, welche neben physikalischen Effekten auf einem deutlichen Beitrag der chemisch-puzzolanen Reaktion beruhen. Dies konnte von Beuntner [4] erstmals auch für kaolinarme Tongemische nachgewiesen werden. Der Festigkeitsbeitrag beruht dabei nicht nur auf der silikatischen Reaktion durch Bildung von C-S-H-Phasen, sondern zusätzlich auf einem festigkeitssteigernden Beitrag der AFm-Phasen. Die bevorzugte Bildung von AFm-Phasen konnte gerade bei aluminiumreichen calcinierten Tonen in [4, 30, 33] aufgezeigt und nachgewiesen werden. AFm-Phasen selbst gelten aufgrund ihrer lamellaren Struktur, als wenig festigkeitsbildend. Untersuchungen [4] belegen jedoch mit steigender Wasserbindung in den AFm-Phasen eine Erhöhung des Hydratphasenvolumens der Bindemittelmatrix und eine gefügeverdichtende Wirkung, welche in einer Festigkeitssteigerung des Bindemittelsteins mündet (Abbildung. 11).

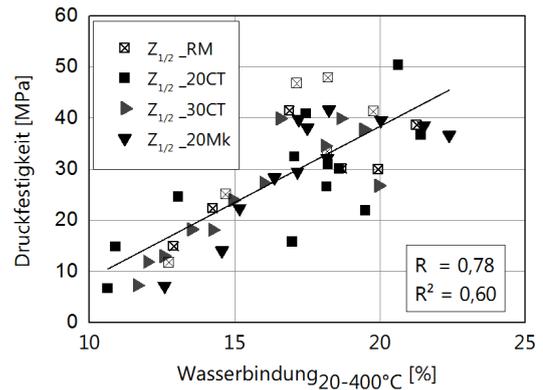


Abb. 11: Korrelation zwischen den Druckfestigkeiten nach 28 Tagen und dem gebundenen Wasser in Hydratphasen [4]

Die aus dem puzzolanen Reaktionsmechanismus resultierende Erhöhung des Hydratphasenvolumens verändert des Weiteren die Porenstruktur des Zementsteins. Beuntner [4] konnte übereinstimmend mit Ergebnissen von [42, 43] eine Verfeinerung der Porenstruktur unter gleichzeitiger Erhöhung des Gelporenanteils aufzeigen. Baquerizo et al. [44] berichten von einer guten Volumenstabilität der AFm-Phasen und dabei vor allem einer geringeren Sensibilität von Carboaluminaten und Strätlingit gegenüber Schwankungen der Temperatur und Feuchte sowie mehr Stabilität gegenüber Schwinden. Eigene Untersuchungen [39, 45] bestätigen eine geringere Schwindverformung von Betonen unter Zusatz calcinierter Tone.

Die Optimierung der Mikrostruktur durch calcinierte Tone über eine erhöhte Gefügedichtheit ist maßgebend für die Dauerhaftigkeitseigenschaften der damit hergestellten Betone. Der Widerstand gegen das Eindringen von Chloriden in das Betongefüge ist für Stahlbetonkonstruktionen ein entscheidender Parameter für die Lebensdauerbemessung. Übereinstimmend belegen Siddique [46] für metakaolinhaltige Betone als auch Thienel [39] für Betone mit calcinierten Tongemischen eine signifikante Reduzierung des Chloridmigrationskoeffizienten bei Austausch des Zementes gegen calcinierte Tone. Eine erhöhte Carbonatisierungsneigung wird in der Literatur [21, 39, 47, 48] für verschiedene Zementgemische mit calcinierten Tonen gegenüber reinen Portlandzementen nachgewiesen und liegt in der Größenordnung von Kompositzementen. Für optimierte Bindemittelkombinationen konnte Cyr [47] in Untersuchungen einen verminderten Carbonatisierungsfortschritt aufzeigen.

Die Widerstandsfähigkeit gegenüber Frost- und Frost-Tausalz-Angriff wird am deutlichsten von der Vielfalt der mineralogischen Zusammensetzung calcinierter Tone, dem Calciniierungsprozess, dem Dehydroxylierungsgrad und der puzzolanen Effizienz

nach dem Calcinieren sowie der gewählten Zementkomposition im Beton beeinflusst. Entsprechend schwierig sind derzeit erste Bewertungen zur Dauerhaftigkeit von Betonen mit calcinierten Tonen unter Frost- und Frost-Tausalz-Angriff. Von Pierkes et al. [48] wurden entsprechende Betonuntersuchungen an Kompositzementen mit 20 bzw. 40 M.-% calciniertem Ton durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen eine ausreichende Widerstandsfähigkeit, die im Bereich etablierter Betone mit üblichen Kompositzementen liegt.

5 Zum Potenzial calcinierter Tone als zukünftiger Zementersatzstoff

Die Baustoffindustrie steht vor der Herausforderung, den steigenden Bedarf an Kompositzementen und Betonzusatzstoffen zu immer größeren Teilen mit leistungsfähigen, neuartigen Materialien abdecken zu müssen. Calcinierte Tone stellen dabei eine attraktive und zukunftsorientierte Ergänzung zu herkömmlichen SCM dar. Sie bieten die Möglichkeit, ökologisch und technisch verbesserte Betone herzustellen.

Calcinierte Tone können schon heute als puzzolane Zementhauptbestandteil nach DIN EN 197 [34] eingesetzt werden. Alleiniges Kriterium bildet der Nachweis des Gehaltes an reaktiven SiO_2 größer 25 M.-%. Für den baupraktischen Einsatz in Konstruktionsbetonen benötigt dieser Zement für einzelne Expositionsclassen eine Europäische Technische Zulassung (European Technical Approval (ETA)).

Für den Einsatz calcinierter Tone als Betonzusatzstoff ist eine nationale bauaufsichtliche Zulassung entweder über den Nachweis der Leistungsfähigkeit über den äquivalenten w/z-Wert oder aber eine Bindemittelzulassung nach „performance concept“ des Deutschen Instituts für Bautechnik erforderlich.

Die vorangegangenen Ausführungen in Abschnitt 2 zeigen die Vielfältigkeit des Materials, welches vereinfacht unter dem Begriff „Calcinierte Tone“ derzeit in weltweiten Forschungsprojekten, aber auch zunehmend in industriellen Entwicklungen Interesse findet. Für die Bauindustrie wirtschaftlich äußerst attraktiv sind die als natürlich vorkommende Tone, oberflächennah verfügbare Tongemische, welche in ihrer Zusammensetzung lokal sehr stark variieren. Die Komplexität dieser Tongemische darf sowohl bei der Bewertung zur Eignung als SCM als auch bei der Festlegung eines optimalen Calciniierungsprozesses nicht unterschätzt werden. Für die puzzolane Effizienz im Beton ist eine zielgerichtete Abstimmung mit dem Zement unter Berücksichtigung von granulometrischen Parametern essentiell. Die Verwendbarkeit von calcinierten Tongemischen in Mörteln und Betonen bei hohen Substitutionsraten bis 30 % stellt sich gerade wegen der geringeren

und tendenziell auch retardierenden Reaktivität der Tongemische im Vergleich zu hochreaktivem Metakaolin als besonders interessant dar. Die Kombination von reaktiven Komponenten (calcinierten Schichtsilikaten) in Anteilen bis 70 M.-% und inerten Bestandteilen, wie Quarz und Feldspäten in den jeweiligen calcinierten Tongemischen, ist sehr effektiv, da sie zugleich den Füllereffekt und die puzzolane Effizienz im Beton ausnutzen kann. Für die Auswahl calcinierter Tone sollte der Kaolinitgehalt nicht als alleiniger Indikator der Reaktivität herangezogen werden, sondern der Beitrag der Drei- und Vierschichtsilikate ebenfalls berücksichtigt werden.

Für den **Einsatz als Zementumahlstoff** ergeben sich vielversprechende Möglichkeiten, die puzzolane Effizienz über eine gezielte Ausnutzung von Synergieeffekten zu steigern [49]. Die erfolgreiche Kombination von verschiedenen Ersatzstoffen mit Klinker zur Herstellung leistungsfähiger Kompositzemente stellt dabei eine große Aufgabe für die Zukunft dar. Aufgrund der unterschiedlichen Mahlbarkeit der Komponenten, werden weitere Untersuchungen zeigen müssen, welche Möglichkeiten sich für Kompositzemente bei getrennter oder gemeinsamer Vermahlung ergeben. Erste, grundlegende Untersuchungen liegen vor [50, 51].

Aus **betontechnologischer Sicht** bietet sich mit calcinierten Tonen die Möglichkeit Betone herzustellen, die robuster gegenüber Schwankungen in der Dosierung des Anmachwassers sind. Gerade für Betonwaren bieten sich große Vorteile bei der Herstellung, da der Frischbeton bei gleicher Konsistenz unter Zusatz calcinierter Tone eine bessere Verdichtungswilligkeit zeigt. Die Ausblühneigung von Betonen wird aufgrund der Calciumhydroxidbindung während der puzzolanen Reaktion deutlich verringert. Jedoch konnte gegenüber Metakaolinen auch ein deutlich geringerer Calciumhydroxidverbrauch aufgezeigt werden, was grundsätzlich für die Anwendung in Stahlbeton begrüßenswert ist [4]. Aufgrund des Eisengehaltes in Tongemischen weisen diese nach dem Calcinieren eine leichte Ockerfärbung auf, was im Erscheinungsbild des Festbetons aber stark relativiert wird und für viele Anwendungen keine Einschränkungen ergibt. Eine reduzierende Ofenatmosphäre beim Calcinieren bietet sich hier als Abhilfe an.

Gerade für reinphasige calcinierte Tone stellen Verarbeitbarkeit und Dauerhaftigkeit einen limitierenden Faktor dar und beschränken erheblich die sinnvolle Substitutionsrate im Beton. Hier weisen Tongemische mit ihren möglichen partiellen Austauschraten bis 30 % einen klaren Vorteil auf.

Ein weiterer wichtiger Aspekt zur Bewertung des zukünftigen Potenzials ist die Anrechenbarkeit der calcinierten Tone im Beton, definiert als k-Wert. Dieser findet beim Mischungsentwurf im äquivalen-

ten w/z-Wert Berücksichtigung und wird vom Deutschen Institut für Bautechnik auf Grundlage der Zulassungsprüfungen festgelegt. Für die etablierten Betonzusatzstoffe vom Typ II liegen die k-Werte bei 0,4 für Steinkohlenflugasche [52], 0,6 für Hüttensand [53] und 1,0 für Silicastaub [52]. Calcinierte Tone erreichen nach 28 Tagen eine hohe Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit von der Zementzusammensetzung (Abb. 12) und reihen sich damit zwischen Hüttensand und Silicastaub ein.

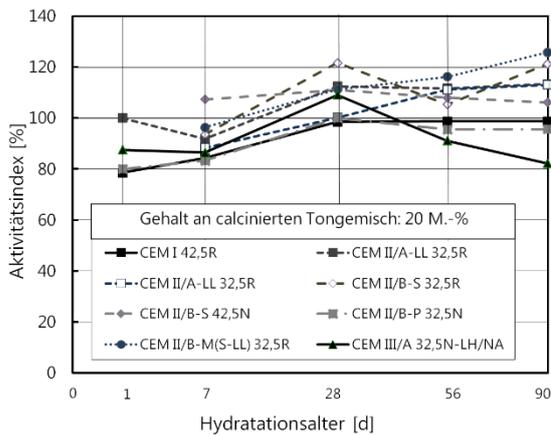


Abb. 12: Aktivitätsindex für ein calciniertes Amaltheen-Tongemisch in Kombination mit verschiedenen Zementen [39]

Die als SCM geeigneten Tone sind von Natur aus kalkarm, weshalb sich auch die erwünschten **ökologischen Vorteile** ergeben. Während des Calciniierungsprozesses der Tone ist das Entsäuerungspotenzial von Kalkstein nur gering zumal die meisten Tongemische nach bisherigen Einschätzungen unterhalb der Entsäuerungstemperatur von Kalkstein (ca. 850 °C) optimal calcinierbar sind. Anders als bei etablierten SCM wie Steinkohlenflugasche und Hüttensand handelt es sich bei calcinierten Tönen um ein gezielt hergestelltes Produkt mit klar definierten Eigenschaften. Entsprechend sind Produktionsstätten erforderlich, wie sie exemplarisch in Abschnitt 2.2 vorgestellt wurden. Die Kosten calcinierter Tone werden aufgrund der Calciniierungs- und Mahlprozesse eher über denen von Nebenprodukten anderer Industrien liegen. Zusammen mit den Transportkosten wird es voraussichtlich aus wirtschaftlichen Gründen eher eine dezentrale Versorgung des Marktes geben.

Die mögliche einzusparende Menge an nicht erneuerbarer Primärenergie und CO₂-Emission je Kubikmeter Beton hängt ganz entscheidend von der Substitutionsrate und der Leistungsfähigkeit der SCM sowie von ihrer Anrechenbarkeit auf den Zementgehalt ab. Die nachfolgende Tabelle enthält Angaben über den Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie für verschiedene Zementtypen und ein calciniertes Amaltheen-Tongemisch.

Tab. 3: Klinkergehalt und Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie von Zementen und calciniertem Amaltheen-Tongemisch [54]

	Klinkergehalt [%]	nicht erneuerbare Primärenergie (Mittelwert) [MJ/t]
CEM I	95 - 100	4355
CEM II/B-M	65 - 79	3220
CEM III-A	35 - 64	2156
calciniertes Amaltheen-Tongemisch	-	1731

6 Zusammenfassung

Calcinierte Tone bieten zukünftig eine attraktive Möglichkeit, ökologische und technisch optimierte Betone herzustellen. Die Leistungsfähigkeit der damit hergestellten Betone kann durch die Auswahl eines geeigneten calcinierten Tons gezielt auf die Anforderungen an Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit angepasst werden. Calcinierte Tone haben das Potenzial, eine bedeutsame Rolle als Zementersatz- und Betonzusatzstoff einzunehmen und einen entscheidenden Beitrag für die weltweit angestrebte Minderung des Klinkerfaktors und die Einsparung von CO₂-Emissionen in der Baustoffindustrie zu liefern.

7 Literatur

- [1] International Energy Agency (IEA), Cement Sustainability Initiative (CSI) World Business Council for Sustainable DW. Cement Technology Roadmap 2009 - Carbon emissions reductions up to 2050. IEA Publications. p. 36.
- [2] Schneider M, Romer M, Tschudin M, Bolio H. Sustainable cement production—present and future. Cement Concrete Res. 2011;41(7):642-50.
- [3] Schwarzkopp F, Drescher J, Gornig M, Blazejczak J. Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2030 in Deutschland. Berlin: Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e. V.; 2013. p. 92.

- [4] Beuntner N. Zur Eignung und Wirkungsweise calcinierter Tone als reaktive Bindemittelkomponente in Zement Dissertation. Neubiberg, Universität der Bundeswehr München; 2017.
- [5] Murat M. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals: II. Influence of mineralogical properties of the raw-kaolinite on the reactivity of metakaolinite. *Cement Concrete Res.* 1983;13(4):511-8.
- [6] Murat M. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals: I. Preliminary investigation on metakaolinite. *Cement Concrete Res.* 1983;13(2):259-66.
- [7] Murat M, Comel C. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals: III. Influence of calcination process of kaolinite on mechanical strengths of hardened metakaolinite. *Cement Concrete Res.* 1983;13(5):631-7.
- [8] Ambroise J, Murat M, Pera J. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals. IV. Experimental conditions for strength improvement on metakaolinite minicylinders. *Cement Concrete Res.* 1985;15(1):83-8.
- [9] Ambroise J, Murat M, Péra J. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals V. Extension of the research and general conclusions. *Cement Concrete Res.* 1985;15(2):261-8.
- [10] He C, Makovicky E, Øsbæck B. Thermal stability and pozzolanic activity of calcined illite. *Applied Clay Science.* 1995;9(5):337-54.
- [11] He C, Øsbæck B, Makovicky E. Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: Activation, reactivity assessments and technological effects. *Cement Concrete Res.* 1995;25(8):1691-702.
- [12] He C, Makovicky E, Øsbæck B. Thermal treatment and pozzolanic activity of sepiolite. *Applied Clay Science.* 1996;10(5):337-49.
- [13] He C, Makovicky E, Øsbæck B. Thermal treatment and pozzolanic activity of Na- and Ca-montmorillonite. *Applied Clay Science.* 1996;10(5):351-68.
- [14] Lagier F, Kurtis KE. Influence of Portland cement composition on early age reactions with metakaolin. *Cement Concrete Res.* 2007;37(10):1411-7.
- [15] Cabrera J, Rojas MF. Mechanism of hydration of the metakaolin-lime-water system. *Cement Concrete Res.* 2001;31(2):177-82.
- [16] Antoni M. Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone Dissertation. Lausanne, École Polytechnique Fédérale de Lausanne; 2013.
- [17] Tironi A, Trezza MA, Scian AN, Irassar EF. Kaolinitic calcined clays: Factors affecting its performance as pozzolans. *Constr Build Mater.* 2012;28(1):276-81.
- [18] Cyr M, Trinh M, Husson B, Casaux-Ginestet G. Effect of cement type on metakaolin efficiency. *Cement Concrete Res.* 2014;64:63-72.
- [19] Marchetti G, Pokorny J, Tironi A, Trezza MA, Rahhal VF, Pavlík Z, et al. Blended Cements with Calcined Illitic Clay: Workability and Hydration. In: Martirena F, Favier A, Scrivener K, editors. *Calcined Clays for Sustainable Concrete - Proceedings of the 2nd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete.* La Havanna, Cuba: Springer Nature; 2018. p. 311-7.
- [20] Garg N, Skibsted J. Pozzolanic reactivity of a calcined interstratified illite/smectite (70/30) clay. *Cement Concrete Res.* 2016;79:101-11.
- [21] Trümer A, Ludwig H-M. Calcinierte Tone als puzzolanischer Betonzusatzstoff. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, editor. 58. DAfStb-Forschungskolloquium. Kaiserslautern: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton; 2017. p. 11.
- [22] Jasmund K, Lagaly G, Köster HM, Kohler EE, Müller-Vonmoos M, Niederbudde EA, et al. *Tonminerale und Tone: Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt.* Darmstadt: Dr. Dietrich Steinkopff Verlag; 1993.
- [23] Okrusch M, Matthes S. *Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde.* 8 ed: Springer Spektrum; 2010.
- [24] Fernandez Lopez R. *Calcined Clayey Soils as a Potential Replacement for Cement in Developing Countries* Dissertation. Lausanne, École Polytechnique Fédérale de Lausanne; 2009.
- [25] Tironi A, Trezza MA, Scian AN, Irassar EF. Thermal analysis to assess pozzolanic activity of calcined kaolinitic clays. *J Therm Anal Calorim.* 2014;117(2):547-56.
- [26] Slade RCT, Davies TW, Atakül H, Hooper RM, Jones DJ. Flash calcines of kaolinite: Effect of process variables on physical characteristics. *J Mater Sci.* 1992;27:2490-500.

- [27] San Nicolas R. Approche performantielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash, Université de Toulouse; 2011.
- [28] Beuntner N, Thienel K-C. Properties of Calcined Lias Delta Clay - Technological Effects, Physical Characteristics and Reactivity in Cement. In: Scrivener K, Favier A, editors. 1st International Conference Calcined Clays for Sustainable Concrete. Lausanne: Springer Netherlands; 2015. p. 43-50.
- [29] Neißer-Deiters A. Einfluss der Calciniertemperatur auf physikalisch-hygroscopische Eigenschaften calcinierter Tone am Beispiel Muskovit Bachelorarbeit. Neubiberg, Universität der Bundeswehr München; 2018.
- [30] Scherb S, Beuntner N, Thienel K-C. Reaction kinetics of the basic clays present in natural mixed clays. In: Martirena F, Favier A, Scrivener K, editors. Calcined Clays for Sustainable Concrete - Proceedings of the 2nd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete. La Havanna, Cuba: Springer Nature; 2018. p. 427-33.
- [31] Beuntner N, Thienel K-C. Calcined clays as alternative supplementary cementitious materials (Calcinierte Tone als alternative Betonzusatzstoffe). In: Walther H-J, editor. 61. BetonTage. Neu-Ulm, Germany: Bauverlag; 2017. p. 50.
- [32] Beuntner N. Leistungsfähigkeit großtechnisch calcinierter Tone und deren Wirksamkeit in zementären Systemen. In: Breitenbücher R, Mark P, editors. Innovationen in Beton - 1. DAfStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium. Bochum: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton; 2013. p. 239-44.
- [33] Beuntner N, Thienel K-C. Solubility and kinetics of calcined clay: study of interaction by pore solution. In: Plank J, Lei L, Echt T, editors. 2nd International Conference on the Chemistry of Construction Materials (ICCCM 2016). Munich, Germany: Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V.; 2016. p. 157-60.
- [34] DIN EN 197-1. Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement (Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements). Berlin: Beuth-Verlag; 2011. p. 40.
- [35] Surana MS, Joshi SN. Spectrophotometric method for estimating the reactivity of pozzolanic materials. *Advances in Cement Research*. 1998;1(4):238-42.
- [36] Buchwald A, Kriegel R, Kaps C, Zellmann H-D. Untersuchung zur Reaktivität von Metakaolinen für die Verwendung in Bindemittelsystemen. Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V. -Jahrestagung. München; 2003. p. 7.
- [37] Avet F, Snellings R, Alujas A, Scrivener K. Development of a New Rapid, Relevant and Reliable (R3) Testing Method to Evaluate the Pozzolanic Reactivity of Calcined Clays. In: Scrivener K, Favier A, editors. Calcined Clays for Sustainable Concrete: Springer Netherlands; 2015. p. 539-44.
- [38] Schmid M, Beuntner N, Thienel K-C, Plank J. Colloid-Chemical Investigation of the Interaction Between PCE Superplasticizers and a Calcined Mixed Layer Clay. In: Martirena F, Favier A, Scrivener K, editors. Calcined Clays for Sustainable Concrete - Proceedings of the 2nd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete. La Havanna, Cuba: Springer Nature; 2018. p. 434-9.
- [39] Thienel K-C, Beuntner N. Effects of Calcined Clay as Low Carbon Cementing Materials on the Properties of Concrete. In: Jones MR, Newlands MD, Halliday JE, Csetenyi LJ, Zheng L, McCarthy MJ, et al., editors. Concrete in the Low Carbon Era. Dundee, UK: University of Dundee - Concrete Technology Unit; 2012. p. 504-18.
- [40] DIN EN 196-1. Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit (Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength). Berlin: Beuth-Verlag; 2005. p. 31.
- [41] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V. DBV-Merkblatt "Besondere Verfahren zur Prüfung von Frischbeton". Ermittlung der Blutneigung (Eimerverfahren). Berlin: Deutscher Beton- und Bautechnikverein; 2007. p. 3.
- [42] Frías M, Cabrera J. Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin-cement pastes. *Cement Concrete Res*. 2000;30(4):561-9.
- [43] Tironi A, Castellano CC, Bonavetti VL, Trezza MA, Scian AN, Irassar EF. Kaolinitic calcined clays - Portland cement system: Hydration and properties. *Constr Build Mater*. 2014;64:215-21.
- [44] Baquerizo LG, Matschei T, Scrivener KL, Saeidpour M, Wadsö L. Hydration states of AFm cement phases. *Cement Concrete Res*. 2015;73:143-57.

[45] Beuntner N, Thienel K-C. Performance and Properties of Concrete made with Calcined Clays. In: Tagnit-Hamou A, editor. ACI SP 320 - 10th ACI/RILEM International Conference on Cementitious Materials and Alternative Binders for Sustainable Concrete. Montreal, Canada: Sheridan Books; 2017. p. 7.1-7.12.

[46] Siddique R, Klaus J. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. *Applied Clay Science*. 2009;43(3-4):392-400.

[47] Bucher R, Diederich P, Escadeillas G, Cyr M. Service life of metakaolin-based concrete exposed to carbonation: Comparison with blended cement containing fly ash, blast furnace slag and limestone filler. *Cement Concrete Res*. 2017;99:18-29.

[48] Pierkes R, Schulze SE, Rickert J. Durability of Concretes Made with Calcined Clay Composite Cements. In: Martirena F, Favier A, Scrivener K, editors. *Calcined Clays for Sustainable Concrete - Proceedings of the 2nd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete*. La Havanna, Cuba: Springer Nature; 2018. p. 366-71.

[49] Antoni M, Rossen J, Martirena F, Scrivener K. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. *Cement Concrete Res*. 2012;42(12):1579-89.

[50] Pérez A, Favier A, Scrivener K, Martirena F. Influence Grinding Procedure, Limestone Content and PSD of Components on Properties of Clinker-Calcined Clay-Limestone Cements Produced by Intergrinding. In: Martirena F, Favier A, Scrivener K, editors. *Calcined Clays for Sustainable Concrete - Proceedings of the 2nd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete*. La Havanna, Cuba: Springer Nature; 2018. p. 358-65.

[51] Kluge W, Assmann BO. Grinding of Calcined Clays and Its Effects on Cement Properties. In: Martirena F, Favier A, Scrivener K, editors. *Calcined Clays for Sustainable Concrete - Proceedings of the 2nd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete*. La Havanna, Cuba: Springer Nature; 2018. p. 244-8.

[52] DIN 1045-2. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1 (Concrete, reinforced and prestressed concrete structures - Part 2: Concrete - Specification, properties, production and conformity - Application rules for DIN EN 206-1). Berlin: Beuth-Verlag; 2008. p. 62.

[53] Ehrenberg A. Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff - Aktuelle Situation in Deutschland und Europa. *Beton-Informationen*. 2010(3/4):48-63.

[54] Thienel K-C, Beuntner N. Ökologisch und technisch verbesserte Betone durch den Einsatz alternativer Zusatzstoffe. In: Schwarz J, Thienel K-C, editors. *Nachhaltigkeit und Innovation*. Universität der Bundeswehr München: Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften; 2013. p. 58-65.

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Karl-Christian Thienel

Institut für Werkstoffe des Bauwesens
Universität der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39
85579 Neubiberg

Dr.-Ing. Nancy Beuntner

Institut für Werkstoffe des Bauwesens
Universität der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39
85579 Neubiberg

Neuartige Bindemittel – Die Zeit nach dem Portlandzement

Horst-Michael Ludwig

Zusammenfassung

Bei der Herstellung von Portlandzementen werden große Mengen an CO₂ emittiert. Vor dem Hintergrund der aktuellen Klimadebatte wird deshalb intensiv an der Reduzierung dieser Emissionen gearbeitet. Das maßgebliche Instrumentarium ist dabei die Substitution von Portlandzementklinker durch geeignete Kompositmaterialien im Zement. Bereits heute ist der reine Portlandzement CEM I in Deutschland nicht mehr die vorherrschende Zementart, sondern wurde durch den Portlandkompositzement CEM II weitgehend abgelöst. Eine noch stärkere Substitution des PZ-Klinkers wird erst möglich sein, wenn die damit verbundenen Qualitätseinbußen (z.B. Frühfestigkeit, Dauerhaftigkeit) kompensiert werden können. Ganz maßgeblich wird auch die Bereitstellung ausreichender Mengen an reaktiven Kompositmaterialien sein. Hier werden zukünftig insbesondere calcinierte Tone und Stahlwerksschlacken eine große Rolle spielen. Die derzeit diskutierten alternativen Bindemittelsysteme ohne oder mit sehr geringem Anteil an Portlandzementklinker sind auf absehbare Zeit kein realistischer Ansatz, um den Portlandzement als Massenbaustoff abzulösen. Sie werden allerdings für spezielle Applikationen, bei denen in Teilbereichen eine besondere Performance verlangt wird, zukünftig verstärkt eingesetzt werden.

1 Einleitung

Bei der Beschäftigung mit neuartigen Bindemitteln drängt sich zunächst die Frage auf, warum überhaupt ein Ersatz für den traditionellen Portlandzement gefunden werden muss. Immerhin hat der neuzeitliche Portlandzement, der ca. 1843 durch W. Aspdin erstmals produziert wurde, über einen sehr langen Zeitraum zuverlässig seine Funktion als Industriekleber in den Betonen erfüllt und erfüllt sie noch heute. Die Bestrebungen ihn durch alternative Systeme zu ersetzen, resultieren aus zwei Grundtendenzen, die das neuzeitliche Bauen beherrschen.

Nachdem in früheren Jahren die Leistungsfähigkeit von Bindemitteln ausschließlich unter technischen und wirtschaftlichen Aspekten bewertet wurde, fließen nun zunehmend auch ökologischen Gesichtspunkten in die Beurteilung mit ein. Die Minderung der CO₂-Emissionen und die Berücksichtigung der Nachhaltigkeit bei der Produktion sind deshalb zukünftig zentrale Aufgabenstellungen für die Zementhersteller. Insbesondere hinsichtlich der CO₂-Emissionen muss die Herstellung von Portlandzementklinkern kritisch betrachtet werden. Pro Tonne Klinker werden ca. 0,80 Tonnen CO₂ freigesetzt, was in Kombination mit den riesigen Zementmengen, die weltweit verbraucht werden (2016 ca. 4 Mrd. Tonnen) dazu führt, dass die Zementindustrie für 5 bis 8 % des anthropogenen Kohlendioxids verantwortlich ist. Die Dimension der Problemstellung wird bei einem Vergleich mit dem so oft in den Schlagzeilen vorkommenden Flugverkehrs deutlich. Während der

gesamte Flugverkehr zu CO₂-Emissionen von ca. 700 Mio. Tonnen jährlich führt, liegen die Emissionen aus der Zementindustrie deutlich über 2 Mrd. Tonnen CO₂ pro Jahr. Vor diesem Hintergrund ergibt sich fast zwangsläufig die Notwendigkeit, sich mit neuen CO₂-reduzierten Bindemitteln auseinanderzusetzen.

Die Notwendigkeit über den konventionellen Portlandzement nachzudenken ergibt sich allerdings auch aus einem zweiten Trend, der zumindest in den hochentwickelten Industrieländern Europas deutlich zu erkennen ist. Während früher nur wenige Zementarten verfügbar waren und für sehr unterschiedliche Applikationen vom Staudamm bis zum Fliesenkleber identische Zemente eingesetzt wurden, werden heute in vielen Bereichen für die Anwendung zugeschnittene Bindemittel mit hoher Leistungsfähigkeit erwartet. Hierfür stehen inzwischen vielfältige Bindemittel, sowohl aus dem genormten wie auch aus dem nicht genormten Bereich zur Verfügung. Nur selten handelt es sich dabei um reine Portlandzemente.

2 Derzeitige Situation in der deutschen und europäischen Zementindustrie

Die Zeit nach dem reinen Portlandzement, die im Titel des Beitrages adressiert wird, hat bereits seit mehreren Jahren begonnen. Während sich über viele Jahrzehnte kaum eine Änderung im Zementportfolio vollzogen hat und der Portlandzement noch bis zum Jahr 2000 mit über 70 % Marktanteil dominierend war, hat sich dies in kürzester Zeit grundlegend geändert. Der

Marktanteil des CEM I halbierte sich in den letzten 10 Jahren (Abbildung 1 mit Daten aus [1]). In der Festigkeitsklasse 32,5 wird in einigen Regionen überhaupt kein CEM I mehr angeboten. An die Stelle des traditionellen Portlandzementes sind Portlandkompositzemente der Gruppe CEM II, die sowohl in Deutschland wie auch in ganz Europa den größten Marktanteil aufweisen, getreten. Der Trend hin zu Kompositzementen der Klasse CEM II wird in Deutschland momentan von hüttensand- und kalksteinmehlhaltigen Zementen getragen. Da die Flugasche in Deutschland traditionell direkt dem Beton zugegeben wird, kommen hier flugaschehaltige CEM II-Zemente bislang kaum zum Einsatz.

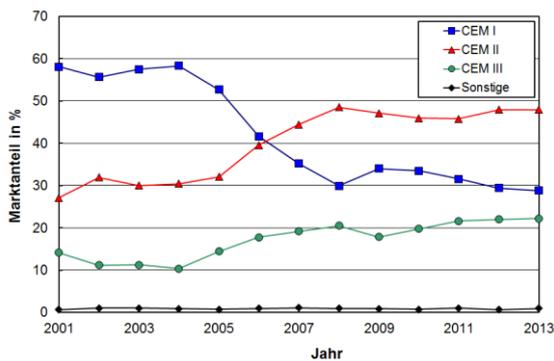


Abb. 1: Marktanteil verschiedener Zementarten in Deutschland von 2001 bis 2013 [1]

Neben den CEM II-Zementen spielen in Deutschland Hochofenzemente der Klasse CEM III traditionell eine große Rolle. Auch diese Zemente haben ihren Marktanteil in den letzten 10 Jahren von ca. 10 % auf über 20 % verdoppeln können. Eine wichtige Zementart ist hier insbesondere der CEM III/A 42,5 N, der im Transportbeton CEM II-Zemente der Festigkeitsklasse 32,5 partiell ersetzt hat.

Aus Abbildung 1 geht neben der grundlegenden Verschiebung der Zementarten hin zu CEM II-Zementen leider auch hervor, dass die Entwicklung weg vom Portlandzement seit mehreren Jahren stagniert und keine weitere Reduzierung des Marktanteils von CEM I Zementen zu verzeichnen ist. Hierfür gibt es neben fehlenden Anreizen aufgrund sehr niedriger CO₂-Preise und momentan noch hoher kostenloser Zuteilungsmengen von Emissionsrechten an die Zementindustrie im Wesentlichen drei wesentliche Gründe.

Festigkeitsentwicklung

Die frühen Festigkeiten liegen bei komposithaltigen Zementen deutlich niedriger als bei reinen Portlandzementen der gleichen Festigkeitsklasse. Je höher der Anteil an Kompositmaterial im Zement eingestellt wird, umso größer wird der Festigkeitsunterschied im frühem Hydratationsstadium. Verantwortlich hierfür ist der inerte, puzzolanische oder auch latent-hydraulische Charakter der Kompositmaterialien, aufgrund dessen festigkeitsbildenden Hydratphasen entweder

in geringerem Umfang oder zu späteren Zeiten gebildet werden. Im Bereich der Transportbetonindustrie wird diese Problematik erst bei sehr hohen Kompositgehalten im Zement relevant, so dass bereits heute CEM II- und sogar CEM III/A-Zemente den Standardzement darstellen. In der Fertigteilindustrie, wo Früh- und Frühstfestigkeiten für einen reibungslosen Ablauf des technologischen Prozesses unabdingbar sind, ist hingegen der Einsatz von Kompositzementen i.d.R. auf die Klasse CEM II/A beschränkt.

Dauerhaftigkeit

Für den möglichen Einsatz neuer CO₂-ärmerer Zemente ist die Dauerhaftigkeit ein ganz maßgebliches Kriterium, welches allerdings bei noch unbekanntem Systemen aufgrund des fehlenden Erfahrungsschatzes schwer einschätzbar ist. Dennoch ist es unabdingbar den Blick nicht nur auf eine mögliche CO₂-Einsparung und eine gute Festigkeitsentwicklung zu richten, sondern auch auf das Dauerhaftigkeitspotential des entsprechenden Bindemittels. Ein CO₂-armes Bindemittel, was für bestimmte Expositionen ungeeignet ist und zum frühzeitigem Rückbau eines Betonbauwerkes führen würde, wäre nicht nachhaltig. Gipsbinder beispielsweise haben eine hervorragende Ökobilanz. Staudämme sollte man mit ihnen allerdings nicht bauen.

Für die allermeisten CEM II- und CEM III-Zemente der DIN EN 197 liegen entsprechende Langzeiterfahrungen in der Zwischenzeit vor, so dass ihre Wirkung auf die Betondauerhaftigkeit relativ sicher prognostizierbar ist.

Der derzeitige Kenntnisstand zum Dauerhaftigkeitspotential der wichtigsten komposithaltigen Zemente ist in der Tabelle 1 für die wesentlichen Expositionen nach DIN EN 206-1 zusammengefasst. Erkennbar ist, dass im CEM II/A-Bereich unabhängig vom verwendeten Kompositmaterial eine identische Leistungsfähigkeit wie bei reinen CEM I-Zementen erwartet werden kann. Hingegen wirken sich höhere Kompositgehalte (CEM II/B, CEM III) teilweise deutlich auf einige Dauerhaftigkeitskriterien aus [2].

Tab 1: Einschätzung des Dauerhaftigkeitspotentials komposithaltiger Zemente im Vergleich zu CEM I-Zementen (o unverändert, + verbessert, - verschlechtert)

	Frostwiderstand	Frost-Tausalz-Widerstand	Carbonatisierung	Chloridwiderstand
CEM II/A-S	0	0	0	+
CEM II/B-S	0	0	0	+
CEM III/A*	0	0	0	+
CEM II/A-V	0	0	0	0
CEM II/B-V	0/-	0/-	0	+
CEM III/A-LL	0	0	0	0
CEM II/B-LL	0/-	0/-	0	0
CEM III/A	0	0/-	0/-	+
CEM III/B	0	-	-	+

Verfügbarkeit reaktiver Kompositmaterialien

Bei einer im Jahr 2050 zu erwartenden Zementmenge von ca. 6 Mrd. Tonnen stellt sich die Frage, welche Klinkersubstitutionsraten unter Einbeziehung aller verfügbaren Kompositmaterialien überhaupt möglich sind. Von allen in Frage kommenden reaktiven Materialien stehen derzeit lediglich Flugasche (weltweit ca. 700 Mio. t/a) und Hüttensand (weltweit ca. 300 Mio. t/a) in relevanten Mengen zur Verfügung. Die Anfallmengen beider Stoffe sind dabei erheblichen konjunkturellen und jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Und beide Stoffströme sind, dies ist bereits heute absehbar, zukünftig nicht mehr in der derzeit vorhandenen Quantität und u.U. auch Qualität verfügbar. Bei der Flugasche wird die Menge mit der zunehmenden Nutzung alternativer Energien gerade auch in Deutschland signifikant abnehmen. Die verbleibende Menge wird durch Änderungen im technologischen Prozess nicht mehr uneingeschränkt nutzbar sein (Absenkung der Kesseltemperaturen und dadurch geringerer Glasgehalt, Bindung von Quecksilber durch Zusatz Aktivkohle u. a.). Die Mengen an Hüttensand werden aufgrund der wachsenden Schrottverwertung bei der Stahlherstellung ebenfalls tendenziell sinken. Andere mögliche reaktive Materialien wie Silicastaub, natürliche Puzzolane oder auch im asiatischen Raum die Reisschalenasche spielen mit jährlichen Anfallmengen von deutlich < 50 Mio. t/a für die Absenkung der Klinkerfaktoren in den Zementen allenfalls eine lokal begrenzte Rolle. Natürlich ist der Kalkstein in nahezu unbegrenzter Menge verfügbar. Bedingt durch seine weitgehend inerten Eigenschaften ist die einsetzbare Menge als Klinkersubstitut jedoch stark beschränkt.

3 Alternative Kompositmaterialien

Die Fachwelt ist sich einig: Eine substantielle globale Absenkung der durch die Zementherstellung verursachten CO₂-Emissionen wird mittelfristig nicht durch ausgefallene alternative Bindemittelkonzepte möglich sein, sondern nur durch die konsequente Weiterentwicklung der Klinkersubstitution durch passende Kompositmaterialien. Eine ganz wichtige Herausforderung stellt dabei die Suche nach neuen Materialien dar, die große Mengen an Portlandzementklinker qualitätsneutral ersetzen können. Zwei sehr aussichtsreiche Stoffströme sind dabei die calcinierten Tone und die Stahlwerksschlacken.

3.1 Calcinierte Tone

Von allen potentiell möglichen neuen Kompositmaterialien wird den calcinierten Tonen weltweit die größte Beachtung geschenkt. Folgerichtig fanden bereits zwei große internationale Konferenzen „International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete“ statt [3], [4], die sich

ausschließlich dieser Problematik widmeten und auf denen der derzeitige Stand der Forschung auf diesem Gebiet diskutiert wurde. Auch die Bauhaus Universität Weimar (BUW) forscht auf diesem Feld sehr intensiv [5], [6], [7].

Der große Vorteil calcinierter Tone ist ihre weltweite Verfügbarkeit und damit verbunden geringe Transportentfernungen zum Ort der Zementherstellung. Nachteilig ist die Notwendigkeit, die Tonmineralien mit Hilfe eines Temperaturprozesses in ein natürliches getempertes Puzzolan umwandeln zu müssen (nach EN 197-1 – Kompositmaterial Typ Q). Breitere Anwendung fanden bislang fast ausschließlich getemperte kaolinitreiche Tone, die als Metakaolin entweder als Ersatz für Silicastaub in Hochleistungsbetonen oder als alumosilicatische Komponente in Geopolymeren zur Anwendung kamen. Um calcinierte Tone zukünftig auch als Hauptbestandteil im Zement zu nutzen, wird es allerdings notwendig sein, auch auf stärker verunreinigte Tone zurückzugreifen, die als Haupttonmineral nicht nur Kaolinit sondern u. U. auch Montmorillonit oder gar Illit aufweisen. Solche verunreinigten Tone sind sehr weit verbreitet und die Zementindustrie müsste darüber hinaus anders als bei kaolinitreichen Tonen nicht in einen kostenintensiven Wettbewerb mit anderen Industrien wie der Papierindustrie oder der keramischen Industrie treten.

Vor dem Einsatz solcher Tone sind wesentliche Fragestellungen zu klären, die sowohl die Produktionsbedingungen als auch die späteren Eigenschaften entsprechender Betone umfassen. Dabei ist zu bedenken, dass sich die Tone teilweise sehr grundsätzlich unterscheiden und somit der Erfahrungsbereich des Metakaolins verlassen wird [8], [9].

Im Rahmen dieses Symposiums wird die Thematik calcinierte Tone im Beitrag von Thienel und Beuntner „Calcinierte Tone und ihr Potenzial für die moderne Betontechnologie“ umfangreich diskutiert, so dass an dieser Stelle auf eine weitergehende Betrachtung verzichtet werden soll.

3.2 Stahlwerksschlacken

Ein weiteres potentielles Kompositmaterial für den Zement sind die Stahlwerksschlacken. Mit steigender Tendenz fallen derzeit ca. 180 Millionen Tonnen dieser Schlacken weltweit an. In Deutschland sind insgesamt ca. 7 Millionen Tonnen Stahlwerksschlacke jährlich verfügbar, davon 4,5 Millionen Tonnen Konverterschlacke (LDS) und 2,5 Millionen Tonnen Elektrofenschlacke (EOS). Im Gegensatz zu den granulierten Hochofenschlacken (Hüttensand) zeigt Stahlwerksschlacke im ursprünglichen Zustand keine nennenswerte Reaktivität. Deshalb werden die anfallenden Schlacken in Deutschland bislang nicht im Zement eingesetzt, sondern kommen im Straßenbau

in ungebundenen Tragschichten oder auch in bituminös gebundenen Trag- und Deckschichten zum Einsatz. Ein erheblicher Teil muss auch deponiert werden.

Deshalb wurden in der Vergangenheit erhebliche Anstrengungen unternommen, um das Material in einen reaktionsfähigen Zustand zu überführen. Die Bauhaus Universität Weimar hat gemeinsam mit der Fa. Loesche zwei sehr aussichtsreiche Ansätze entwickelt, um zukünftig Stahlwerksschlacken als Kompositmaterial im Zement nutzen zu können.

Verklinkerung von Stahlwerksschlacken

Durch intensive Forschungsarbeiten der Fa. Loesche in Zusammenarbeit mit der Bauhaus Universität Weimar (BUW) ist es gelungen, die Stahlwerksschlacke so zu modifizieren, dass ein klinkerähnliches Produkt entsteht [10], [11]. Durch einen modifizierten Herstellprozess unter reduzierender Atmosphäre wird zum einen elementares Eisen rückgewonnen, welches dem Stahlherstellungsprozess wieder zugeführt werden kann. Zum anderen entsteht eine mineralische Restphase, die ähnlich zusammengesetzt ist wie Portlandzementklinker. Auf Abbildung 2 ist die Zusammensetzung einer Schlacke vor und nach der Modifizierung dargestellt. Bemerkenswert und für die späteren Eigenschaften der Zemente entscheidend ist der sich bildende hohe Alitgehalt, der in der modifizierten Stahlwerksschlacke zwischen 60 und 70 M.-% liegt.

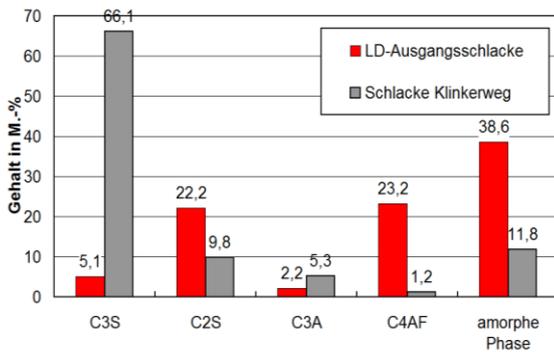


Abb. 2: Phasenbestand einer LD-Schlacke vor und nach der Modifizierung

Werden diese modifizierten Stahlwerksschlacken aufgemahlen in Kompositzementen mit 30 M.-% als Klinkersubstitut eingesetzt, werden Festigkeitsverläufe erreicht, die denen reiner Portlandzemente entsprechen. Untersuchungen zu anderen Betoneigenschaften wie Verarbeitbarkeit, Verformung oder Dauerhaftigkeit und auch zur Passivierung des Bewehrungsstahls liegen derzeit noch nicht vor. Selbst bei positiv verlaufenden Betonuntersuchungen wird sich

zeigen müssen, ob die zur Einführung der Technologie notwendigen erheblichen Investitionen durch die Stahlindustrie wirklich getätigt werden.

Feinstmahlung von Stahlwerksschlacken

Auch ohne die oben diskutierte Verklinkerung enthalten Stahlwerksschlacken bereits im Ausgangszustand Klinkermineralanteile zwischen 10 und 40 M. %. Dennoch zeigen diese Schlacken im üblichen Feinheitsbereich kaum hydraulische Reaktivität. Bislang wurde davon ausgegangen, dass aufgrund der thermischen Genese generell eine Aktivierung dieser Phasen ausgeschlossen ist [12]. Der Forschungsverbund BUW und Loesche GmbH konnte zeigen, dass bei einer ausreichenden Feinstmahlung die Klinkerphasen in den Stahlwerksschlacken sehr wohl reaktivierbar sind und hohe eigenständige Festigkeitsbeiträge in Mischzementen leisten [13]. Wesentlich war dabei der Nachweis, dass die reaktiven Phasen im ursprünglichen Zustand durch die eisenhaltigen Mineralphasen dicht umschlossen werden, so dass eine Reaktion mit dem Anmachwasser nicht stattfinden kann (Abbildung 3).

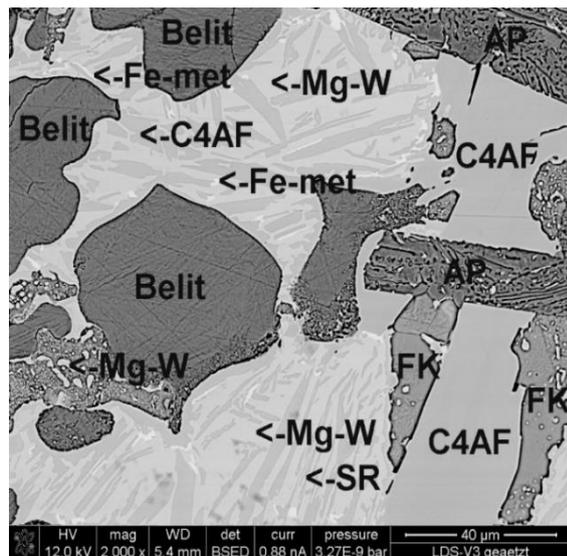


Abb. 3: Abschirmung der Belitkristalle durch eisenhaltige Phasen (z.B. Mg-W Magnesiumwüstit oder SR = Srebrodolskit) in unzureichend aufbereiteter LD-Schlacke

Die Abschirmung kann durch eine konventionelle Mahlung auf praxisübliche Feinheiten nicht aufgehoben werden. Erst eine Feinstmahlung auf Feinheiten $\geq 6000 \text{ cm}^2/\text{g}$ führt zur Freilegung der in den Stahlwerksschlacken enthaltenen Belitphasen, wobei die Art der Aufbereitung in einer Loeschmühle zusätzliche Reaktionsflächen durch eine Rissinduktion generiert (Abbildung 4).

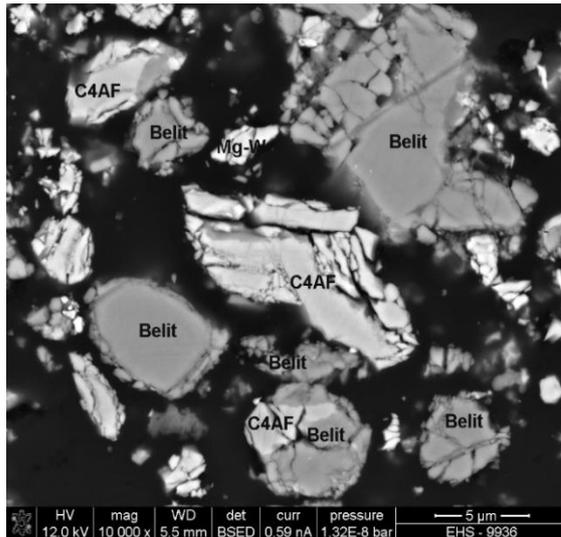


Abb. 4: Freilegung reaktiver Oberflächen und Rissinduktion in grobkristalline Belitphase durch Feinstaufbereitung in vertikalen Rollenmühlen

Die mit höherer Feinheit zunehmende Reaktivität in einem Mischzement CEM II/B mit 30 % LD-Schlacke ist auf Abbildung 5 dargestellt. Eine solche Feinstmahlung wäre bei der Nutzung herkömmlicher Technologien für die Herstellung von Massenzementen deutlich zu teuer. Durch ein neues von Loesche und der BUW patentiertes Verfahren kann der Energiebedarf zum Erzielen hoher Feinheiten signifikant gesenkt werden (z.B. < 100 kWh/t Hüttensand mit 10000 cm²/g).

Die für eine Reaktivierung notwendige Feinstmahlung und deren genereller Erfolg hängt von der Charakteristik der Schlacken und insbesondere von der Ausprägung der Belitphase ab. Neben dem „normalen“ Belit, wie er auch aus dem Portlandzementklinker bekannt ist, tritt in den LD-Schlacken auch röntgenamorpher Belit auf. Dabei handelt es sich nicht um eine Glasphase, sondern um extrem kleine Belitkristalle (Abbildung 6). Die beiden Belitformen lassen sich in unterschiedlicher Weise durch eine Feinstmahlung aktivieren. Während der grobkristalline Belit durch die Abtrennung der eisenhaltigen Mineralphasen und die Freilegung der Belitoberflächen sehr gut aktivierbar ist, gelingt diese Trennung aufgrund der Kleinheit der Kristalle beim röntgenamorphen Belit nicht. Hier bleibt die Abschirmung der kryptokristallinen Belite durch eisenhaltige Mineralphasen auch nach der Feinstmahlung erhalten.

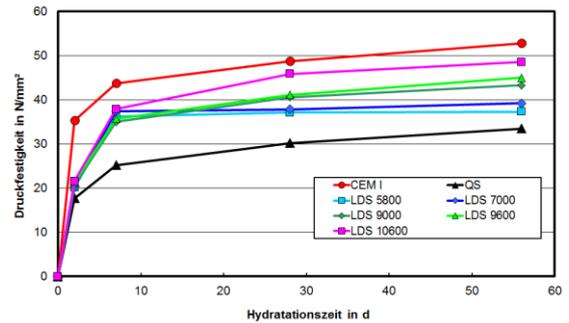


Abb. 5: Druckfestigkeitsentwicklung für CEM I und die Mischungen mit 30 M.-% LD-Schlacken unter schiechlicher Feinheit (Angaben in cm²/g), inertes Vergleichsmaterial Quarzmehl QS

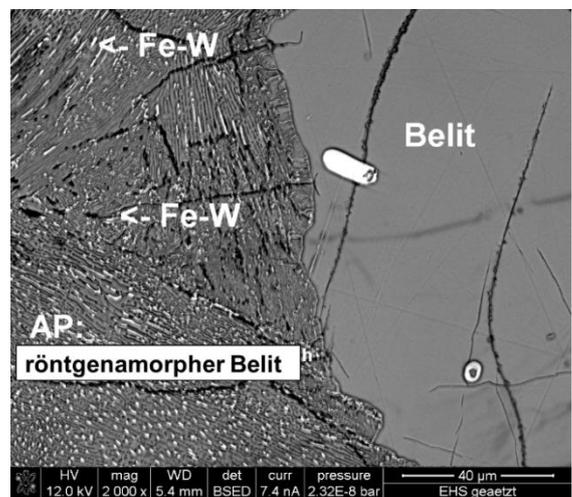


Abb. 6: Ausprägung der Belitphasen in den LD Schlacken - grobkristallin und röntgenamorph

4 Alternative Bindersysteme

4.1 Weiterentwicklung bereits bekannter Bindersysteme

Neben der Nutzung und Weiterentwicklung von Instrumentarien zur Senkung von CO₂-Emissionen im Rahmen der traditionellen Zementherstellung wird weltweit nach Möglichkeiten gesucht, neue CO₂-arme oder -freie Bindemittelsysteme zu entwickeln. Ein Teil der Aktivitäten richtet sich auf Bindersysteme, die teilweise schon seit sehr langer Zeit bekannt sind, durch die CO₂- und Nachhaltigkeitsdebatte aber wieder im Blickpunkt des Interesses stehen.

Zu dieser Gruppe von Bindern gehören insbesondere:

- Geopolymere [14], [15], [16]
- Sulfathüttenzemente [17], [18], [19]
- Belitzemente [20], [21]
- Calciumsulfoaluminatzemente

Geopolymere als Kombination eines hochalkalischen Anregers mit einer reaktiven aluminosilicatischen Komponente (vorzugsweise Metakaolin) und **Sulfathüttenzementen** als Gemisch aus gemahlenden Hütten sand, Anhydrit/Gips und geringen Mengen Portlandzement (1 - 2 %) als Anreger sind bereits seit vielen Jahren am Markt eingeführt. Aufgrund ihrer Herstellung und Zusammensetzung sind beide Bindemittel bezüglich ihrer CO₂-Emission als positiv anzusehen. Allerdings zeigen sie - neben einigen Vorteilen (insbesondere erhöhter chemischer Widerstand) - in ihrer derzeitigen Ausprägung auch signifikante Nachteile gegenüber dem traditionellen Portlandzement. Dies betrifft einige Dauerhaftigkeitskriterien und bei den Geopolymeren auch den Einsatz von stark alkalischen Lösungen. Nachdem im Spritzbetonbereich seit längerem aus Gesundheits- und Umweltgründen auf den Einsatz alkalihaltiger Beschleuniger verzichtet wird, ist es schwer vorstellbar, dass Geopolymersysteme mit flüssigen hochalkalischen Anregern ihren Weg auf die Baustelle finden. Darüber hinaus stellt sich bei beiden Bindemittelsystemen die Frage der Verfügbarkeit der Ausgangsstoffe. Für leistungsfähige Geopolymere werden in der Regel signifikante Mengen an Natriumsilicaten (Wasserglas) zur Anregung der aluminosilicatischen Reaktionskomponente benötigt. Da die jährliche weltweite Herstellmenge dieser Natriumsilicate unter 10 Millionen Tonnen liegt, können ausgehend von den gängigen Rezepturen lediglich 40 bis 50 Millionen Tonnen wasserglasbasierte Geopolymere produziert werden. Bei Sulfathüttenzementen sieht die Situation nicht besser aus. Die notwendigen hohen Hütten sandmengen sind bereits komplett in anderen Zementarten gebunden (CEM II-S, CEM III), so dass die Herstellung großer Mengen von Sulfathüttenzement schon aus diesem Grunde nicht möglich ist. Sowohl Sulfathüttenzemente wie auch Geopolymere werden wohl auch zukünftig eher in speziellen Anwendungen und nicht als Massenbaustoffe eingesetzt.

Der klassische **Belitzement**, bei dem Belit die Hauptphase des Zementes darstellt, eignet sich nicht für eine deutliche herstellseitige CO₂-Einsparung. Die CO₂-Emissionen bei der Bildung der Phase Belit liegen nicht weit von denen des Alits entfernt. Es können zwar etwas niedrigere Brenntemperaturen bei der Herstellung des Klinkers genutzt werden. Allerdings wird im Gegenzug mehr Energie für den Mahlprozess benötigt, da Belit eine schlechte Mahlbarkeit aufweist. Hinzu kommt, dass die klassischen Belitmodifikationen sehr reaktionsträge sind und noch nach Jahrzehnten im Beton nichtreagierter Belit gefunden werden kann. Im asiatischen Raum scheint der Belitzement dennoch eine zunehmend wichtige Rolle zu spielen. Die Gründe hierfür sind aber wohl

weniger im energetischen und umweltpolitischen Bereich zu suchen, sondern eher in der für einige Bauaufgaben hervorragend geeigneten Performance des Belitzementes begründet. So wurde beispielsweise ein HBC (high belite cement) mit einem Belitgehalt von ca. 55 % aufgrund seiner hervorragenden baupraktischen Eigenschaften (Verarbeitbarkeit, Hydrationswärme, chemischer Widerstand, Schwinden etc.) für den Bau des Dreischluchtenstaudamms in China genutzt. An der Bauhaus-Universität Weimar wird derzeit an Konzepten für einen Belitzement gearbeitet, der bei niedrigen Temperaturen (< 1000 °C) im Drehrohfen gebrannt werden kann und dennoch die Eigenschaften eines normalen Portlandzements aufweist.

Das größte Potential zur CO₂-Einsparung innerhalb der Gruppe von Bindern, die auf bereits bekannten Ansätzen beruhen, wird den **Calciumsulfoaluminaten** (CSA-Zemente) zugesprochen. Insbesondere gehen hier große Zementproduzenten davon aus, dass auch im Massensegment Portlandzement durch optimierte CSA-Zemente ersetzt werden kann. Deshalb soll auf diese Zementart etwas ausführlicher eingegangen werden. CSA-Zemente sind bereits seit dem Patent von Alexander Klein aus dem Jahr 1963 bekannt [22]. Der klassische CSA-Zement mit Ye'elimit als Hauptphase wird seit den 1970er-Jahren in China produziert und eingesetzt [23]. Anwendungsfelder sind dabei zumeist spezielle Applikationen, die die besonderen Eigenschaften der CSA-Zemente, wie schnelles Erstarren, hohe Frühfestigkeit und Schwindkompensation ausnutzen. Daneben kamen diese Zemente vereinzelt auch im konstruktiven Bereich zum Einsatz [24], [25]. Aufgrund der hohen Aluminiumgehalte in den klassischen CSA-Zementen (30 - 40 %) und dem hierfür notwendigen sehr teuren Bauxit als Rohstoffkomponente sind die Zemente aber allein schon von der Kostenseite als Massenzemente ungeeignet. Bezüglich der Senkung der CO₂-Emissionen bieten die CSA-Zemente hingegen ein sehr hohes Potential, da bei der Bildung der Hauptphase Ye'elimit deutlich weniger CO₂ freigesetzt wird, als bei den Klinkerphasen des Portlandzementes (Angaben nach [26]):

Alit	C ₃ S	= 0,578 g _{CO2} /g _{phase}
Belit	C ₂ S	= 0,511 g _{CO2} /g _{phase}
Aluminatferrit	C ₂ (A,F)	= 0,362 g _{CO2} /g _{phase}
Calciumsulfoaluminat	C ₄ A ₃ \$	= 0,216 g _{CO2} /g _{phase}

Daneben kommen aufgrund der niedrigeren Brenntemperaturen (ca. 1250 °C) und der leichteren Mahlbarkeit des CSA-Klinkers weitere CO₂-Einsparungen hinzu. In der Summe werden deshalb verglichen mit einem OPC bei CSA-Zementen je nach Zusammensetzung ca. 20 bis 30 % weniger CO₂ emittiert [27].

Massenwirksam umsetzbar sind diese Einsparpotentiale allerdings, wie bereits erwähnt, vor dem Hintergrund der hohen Kosten für die Ausgangsstoffe derzeit nicht. Deshalb konzentrieren sich neuere Forschungen und Entwicklungen auf sogenannte Belit Calcium Sulfoaluminat Zemente (BCSA) mit Belit und nicht Ye'elimite als Hauptphase. Um den Aluminiumgehalt im System weiter abzusenken wird meist noch ein Eisenträger hinzugegeben, so dass auch größere Mengen C_4AF entstehen und der Al_2O_3 -Gehalt der Zemente auf 14 – 17 % abgesenkt werden kann [28].

Inzwischen ist fast das gesamte Dreistoffsystem C_4A_3S - C_2S - andere Komponenten mit Patenten belegt (Abbildung 7).

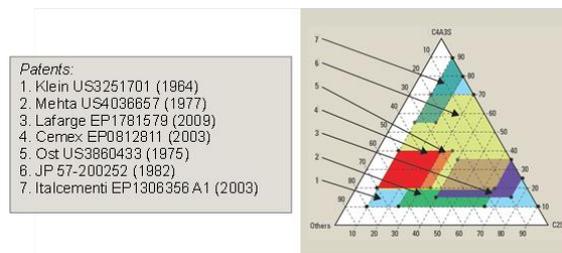


Abb. 7: Patentsituation im System C_4A_3S - C_2S - andere [nach 29]

Maßgeblich für die Anwendung der Zemente im konstruktiven Bereich sind Fragen der Dauerhaftigkeit und der Passivierung der Stahleinlagen im Beton. Hier existieren bislang nur wenige Untersuchungen, die sich teilweise widersprechen. Insbesondere aufgrund des dichten Gefüges zeigen Betone auf der Basis von CSA-Zementen einen guten Sulfat- und Chloridwiderstand [30], [31]. Hingegen wird der Carbonatisierungswiderstand im Vergleich mit OPC-Betonen von nahezu allen Autoren schlechter eingeschätzt [32], [33].

Zum pH-Wert der Porenlösung und zum Schutz der Stahlbewehrung liegen differierende Aussagen vor. Ein Teil der Autoren geht von einem pH-Wert oberhalb von 12 aus, was für eine Passivierung der Stahleinlagen ausreichend wäre [34], [35]. Andere Autoren geben deutlich niedrigere pH-Werte für die Porenlösung eines CSA-Zementes an, was den Einsatz des Bindemittels im Stahlbeton in Frage stellen würde [36].

Insgesamt muss festgestellt werden, dass systematische Untersuchungen zu den verschiedenen Dauerhaftigkeitskriterien und zu den Porenlösungen in Abhängigkeit der konkreten Zusammensetzung der Calciumsulfoaluminatzemente, gerade für die vielversprechenden belitreichen CSA-Zemente, bislang fehlen.

4.2 Neue Bindersysteme

Die öffentliche Diskussion und der politische Druck, die aus der CO_2 -Debatte resultieren, sind hauptverantwortlich für immer neue mehr oder weniger seriöse Ansätze für CO_2 -arme oder CO_2 -freie Binder. So existiert eine ganze Reihe von völlig neuartigen Ideen, auf die im Rahmen dieses Beitrags nicht detailliert eingegangen werden kann. Die wichtigsten Innovationen, oder vielleicht auch diejenigen mit der größten öffentlichen Wahrnehmung sind folgende:

- Magnesiumsilicat-Binder mit $Mg(OH)_2$ / M-S-H-Phasen als festigkeitsbildende Phasen (Novacem) [37], [38]
- Carbonat-Binder mit amorphen und metastabilen $CaCO_3$ -Modifikationen als festigkeitsbildende Phasen (Calera) [39], [40]
- Carbosilicat-Binder auf der Basis von Wollastonit (CS) mit einer nach Carbonatisierung entstehenden Mischung aus verschiedenen Carbonaten und Silicaten als festigkeitsbildende Phasen (Solidia) [41], [42]

All diesen Ansätzen ist gemein, dass sich Erhärtungsprodukte bilden, die sich grundlegend von denen in üblichen zementbasierten Betonen unterscheiden. Falls wirklich einmal eine großtechnische Anwendung im Beton erfolgen sollte, wird es bis dahin ein langer Weg sein. Dabei spielen nicht nur die völlig fehlenden Erfahrungen mit solchen Systemen eine Rolle, sondern insbesondere auch die Tatsache, dass aufgrund der stofflichen Ferne keinerlei Analogieschlüsse bezüglich der zu erwartenden Eigenschaften (insbesondere der Langzeiteigenschaften) zu bekannten Zementssystemen möglich sind.

Deutlich vielversprechender sind deshalb neuartige Technologien, die über den Zwischenschritt eines nicht reaktiven Calciumhydroxysilicates (z.B. α - C_2SH) reaktive Binder hervorbringen, die mit Wasser die bereits bekannten C-S-H-Phasen als Träger der Festigkeit ausbilden.

Momentan existieren in dieser Gruppe der **C-S-H-Phasenbinder** zwei unterschiedliche Ansätze.

Beim Celitement-Konzept [43] wird das nichtreaktive Zwischenprodukt über eine aufwendige Reaktionsmahlung in reaktionsfähige Calciumhydroxysilicate umgewandelt. Die Entwicklung befindet sich nach wie vor im Stadium einer kleintechnischen Versuchsanlage. Eine industrielle Herstellung erfolgte bislang nicht. Auch sind bisher kaum Leistungsparameter des neuen Bindemittels verfügbar. Dies bezieht sich insbesondere auch auf Dauerhaftigkeitskenngrößen. So macht das komplette Fehlen von Calciumhydroxid als Hydratationsprodukt die Untersuchung des

Korrosionsschutzes der eingebetteten Stahlbewehrung dringend erforderlich. Unter Umständen kann das Fehlen des stofflichen Puffers gegenüber einer carbonatisierungsbedingten Absenkung des pH-Wertes durch das in der Literatur beschriebene sehr dichte Gefüge kompensiert werden.

Ein anderer Weg hin zu einem C-S-H-Binder wird durch die Bauhaus Universität Weimar gemeinsam mit der Heidelberg Cement AG bei der Herstellung des LTBB (Low Temperature Belite Binder) verfolgt [44], [45], [46]. Das Bindemittel wird auch hier in einem zweistufigen Prozess hergestellt. Zunächst werden die silicium- und kalkhaltigen Komponenten der Rohmischung homogenisiert und dann im Autoklaven bei Temperaturen zwischen 150 °C bis 210 °C und Drücken um 5 bar zur Reaktion gebracht. Dabei entstehen Calciumhydrosilicate (bevorzugt α -C₂SH). Die Calciumhydrosilicate sind zunächst aufgrund von Wasserstoffbrückenbindungen hydraulisch nicht aktiv. Im Gegensatz zum Celitement-Ansatz wird nachfolgend das Zwischenprodukt allerdings nicht in eine Reaktionsmahlung überführt, sondern einer einfach durchzuführenden Calcinierung bei Temperaturen < 500 °C unterzogen. Als Kern des neuen Bindemittels entstehen hochreaktive Belitpolymorphe (x-C₂S) und amorphes C₂S. Als Ergebnis der Hydratation entstehen die aus der OPC-Reaktion bekannten C-S-H-Phasen mit einem mittleren C/S-Verhältnis von 1,7. Daneben bilden sich im Gegensatz zum Celitement auch signifikante Mengen an Calciumhydroxid mit sehr kleiner Partikelgröße (im Mittel 5 µm). Somit ist der Schutz der metallischen Bewehrungseinlagen bei diesem Binder keine offene Fragestellung. Bemerkenswert ist die Reaktionsgeschwindigkeit des Binders. Beide Belitphasen, x-C₂S und amorphes C₂S, zeigen eine höhere Reaktionsgeschwindigkeit als die Alitphase aus dem üblichen Portlandzement und führen bereits nach einem Tag Hydratation zu einem Hydratationsgrad von annähernd 90 % (siehe Abbildung 8).

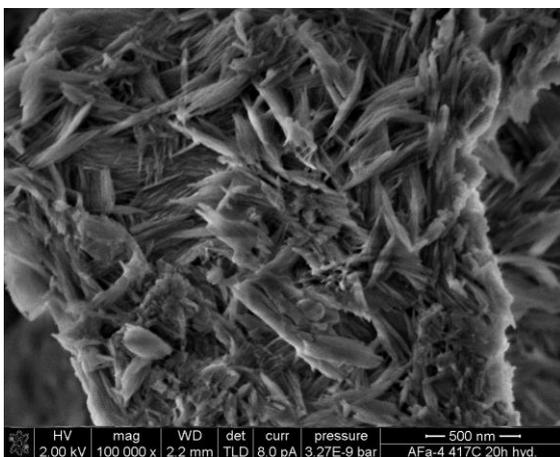


Abb. 8: C-S-H-Nadeln eines LTBB nach 24 h Hydratation, Druckfestigkeit am Normenmörtel 32 N/mm²

Anders als bei dem in Portlandzement vorhandenen Belit, bei dem nichtreagierter Belit noch nach Jahrzehnten im Beton nachweisbar ist, kann sich der hier vorhandene Belit vollständig in entsprechende C-S-H-Phasen umsetzen. Im Vergleich zum Alit werden dabei deutlich mehr festigkeitsbildende C-S-H-Phasen und weniger Calciumhydroxid gebildet, so dass zum Erreichen bestimmter Zielfestigkeiten weniger Bindemittel im Beton eingesetzt werden kann. Auch diese Bindemittelentwicklung befindet sich derzeit im Stadium einer kleintechnischen Herstellung. Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit sind derzeit in Arbeit.

Die beiden diskutierten Ansätze auf Basis von α -C₂SH (Celitement, LTBB) zeichnen sich dadurch aus, dass bei der Hydratation ähnliche Hydratphasen entstehen, wie sie sich auch beim Portlandzement bzw. bei Kompositzementen bilden. Dies wird die Markteinführung entsprechender Binder erheblich vereinfachen.

5 Zusammenfassung

Der Portlandzement war über anderthalb Jahrhunderte das dominierende Bindemittel im Jahrtausendbaustoff Beton. Das wir heute über seine Ablösung nachdenken, hat weniger mit seinem nach wie vor sehr günstigen Kosten/ Nutzen Verhältnis als vielmehr mit seinem sehr hohen CO₂-Rucksack zu tun. Die Ablösung des reinen CEM I wurde in Europa und in Deutschland in den letzten 15 Jahren bereits vollzogen. Den Markt beherrschen heute CEM II Zemente, bei denen bis zu 35 % des Portlandzementklinkers durch Kompositmaterialien wie beispielsweise Hüttensand, Flugasche oder Kalksteinmehl ersetzt werden können. Auch künftig wird die Senkung des PZ-Klinkeranteils im Zement durch passende Kompositmaterialien den Königsweg zur Senkung der CO₂-Emissionen darstellen. Um für Massenzemente Substitutionsgrade oberhalb eines CEM II/B realisieren zu können, also Kompositgehalte von mehr als 35 %, müssen erst noch die Voraussetzungen geschaffen werden. Hierzu gehört vor allem, dass durch neuartige bauchemische Zusatzmittel und geeignete Betonrezepturen die qualitativen Probleme hinsichtlich der Frühfestigkeit und verschiedener Dauerhaftigkeitskriterien von Betonen mit kompositreichen Zementen gelöst werden. Entscheidend wird jedoch sein, dass überhaupt ausreichende Mengen an reaktiven Kompositmaterialien zur Verfügung stehen. Die derzeit verwendeten reaktiven Klinkersubstitute wie Hüttensande und Steinkohlenflugasche werden nicht ausreichen, um höhere Substitutionsraten im Zement zu erreichen, zumal beide Volumenströme zukünftig eher abnehmen werden. Vor allen die calcinierten Tone, aber auch reaktivierte Stahlwerksschlacken bieten sich hier zur Erweiterung der Palette an reaktiven Kompositmaterialien an.

Die vielen alternativen Bindemittelsysteme, die sich derzeit in der Entwicklung befinden oder bereits in begrenztem Umfang am Markt etabliert sind, werden auf absehbare Zeit für den Massenbeton keine Rolle spielen. Hierfür existieren ganz unterschiedliche Gründe, von denen drei wesentliche hier genannt werden sollen:

- Die notwendigen Ausgangsstoffe liegen entweder in einer für einen Massenbaustoff zu geringen Quantität vor, oder sind zu teuer.
- Die Materialien bilden andere Verfestigungsprodukte, deren Langzeitverhalten bislang weitgehend unbekannt ist.
- Entsprechende Betone zeigen eine eingeschränkte Leistungsfähigkeit, insbesondere hinsichtlich verschiedener Dauerhaftigkeitskriterien und dem Schutz der metallischen Bewehrung.

Die neuen alternativen Binder werden sich deshalb zunächst nur in speziellen Applikationen durchsetzen, in denen ihre materialspezifischen Vorteile genutzt werden können. Besonders vielversprechend sind dabei die neuentwickelten C-S-H-Phasen Binder, die sich aufgrund ihrer Zusammensetzung für verschiedene spezielle Anforderungen (z. B. sehr dichtes Gefüge, hoher chemischer Widerstand, geringe Hydratationswärme) anbieten.

6 Literaturverzeichnis

- [1] BDZ-Statistiken 2001 - 2013.
- [2] Ludwig, H.-M: Production and properties of composite cements. 6 th International Congress on Process Technology of Cement Manufacturing, Düsseldorf (BRD) 2009, Proceedings, pp. 89 - 95.
- [3] 1st International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete. Lausanne 2015, Proceedings.
- [4] 2st International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete. Havana 2017, Proceedings.
- [5] A. Trümer, H.-M. Ludwig, K. Rohloff, Investigations into the application of calcined clay as composite material in cement, ZKG 9 (2014), pp. 52 - 57.
- [6] Trümer, A.; Ludwig, H.-M.: The usability of calcined clay blended cements for special durability problems of concrete. 19. IBAUSIL, Weimar 2015, Band 1, S. 441 - 448.
- [7] Trümer, A.; Ludwig, H.-M.: Sulphate and ASR resistance of concrete made with calcined clay blended cements. 1st International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete. Lausanne 2015, Proceedings, pp. 3 - 9.
- [8] Fernandez, R.; Martirena, F.; Scrivener, K.L.: The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. Cement and Concrete Research 41 (2011), pp. 113 - 122.
- [9] Changling, H.; Makovicky, E.; Osbæk, B.: Pozzolanic reactions of six clay minerals: activation, reactivity, assessment and technological effects. Cement and Concrete Research 25 (1995), pp. 1691 - 1702.
- [10] Wulfert, H.; Keyssner, M.; Ludwig, H.-M.; Adamczyk, B.: Metal recovery and conversion of steel slag into highly reactive cement components, ZKG 9 (2013), pp. 34-40.
- [11] Wulfert, H.; Wimmer, G.; M.; Ludwig, H.-M.: A new process or production of cement clinker from steelmaking slags. Cement International 15 (2017) 1, pp. 46 - 51.
- [12] Huang Yi et.al.: An overview of utilization of steel slag. Procedia Environmental Science 16 (2012), pp. 791-801.
- [13] Ludwig, H.-M.; Wulfert, H.; M.; Möser, B.: Mobilization of the hydraulically active phases in LD slags by producing ultrafine material. Cement International 15 (2017) 4, pp. 76 - 86.
- [14] Davidovits, J.: Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis* 27 (1991), pp. 1633-1656.
- [15] Palomo, A.; Grutzeck, M.W.; Blanco-Varela, M.T.: Alkali-activated fly ashe. A cement for the future. *Cement and Concrete Research* 29 (1999), pp. 1323-1329.
- [16] Shi, C.; Jimenez, A.F.; Palomo, A.: New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. Cement and Concrete Research 41 (2011), pp. 750 - 763.
- [17] Stürmer, S.: Die Renaissance des Sulfathüttenzementes in der Bauwerks-sanierung. 14. Ibausil, Weimar 2000, Band 1, S. 373 -374.

- [18] Novak, D.; Novak, R.: Practical experience with a new type of supersulphated cement. *Cement International* 6 (2004), pp. 116 - 125.
- [19] Matschei, T.; Bellmann, F.; Stark, J.: Hydration behaviour of sulphate-activated slag cements. *Advances in Cement Research* 17 (2005), pp. 167 - 178.
- [20] Mielke, I., Müller, A. and Stark, J.: Active belite cement. *Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC), New Delhi (1992), Vol. V, pp. 399-405.*
- [21] Kacimi, L. et al.: Synthesis of belite cement clinker of high hydraulic reactivity. *Cement and Concrete Research* 39 (2009), pp. 559-565.
- [22] Klein, A.: Calciumaluminosulfate and expansive cements containing same. Patent US 3155526 (1964).
- [23] Wang, Y.; Su, M.: The third cement series in China. *World Cement*, 25 (1994), pp. 6-10.
- [24] Zhang, L.; Su, M.; Wang, Y.: Development of the use of sulfo- and ferroaluminate cements in China. *Advances in Cement Research*, 11 (1999), pp. 15-20.
- [25] Glasser, F.P.; Zhang, L.: High-performance cement matrices based on calcium sulfoaluminate-belite compositions. *Cement and Concrete Research*, 31 (2001) pp. 1881-1886.
- [26] Gartner, E.: Industrially interesting approaches to "low-CO₂" cements. *Cement and Concrete Research*, 34 (2004), pp. 1489 - 1498.
- [27] Gartner, E.: Are There Any Practical Alternatives to the Manufacture of Portland Cement Clinker? *Journal of The Chinese Ceramic Society*, 40 (2012), pp. 61-68.
- [28] Aranda, M.A.G.; De la Torre, A.G.: Sulfoaluminate cement, in: F. Pacheco-Torgal, S. Jalali, J. Labrincha, V.M. John (Eds.) *Eco-Efficient Concrete*, Woodhead Publishing, 2013, pp. 488-522.
- [29] Dienemann, W.; Schmitt, D.; Bullerjahn, F.; Haha, B.M.: Belite-Calciumsulfoaluminate-Ternesite (BCT) - a new low-carbon clinker technology. *Cement International*, 11 (2013) 4, pp. 100 - 109.
- [30] Quillin, K.: Performance of belite-sulfoaluminate cements. *Cement and Concrete Research*, 31 (2001), pp. 1341-1349.
- [31] García-Maté, M.; Santacruz, I.; De la Torre, Á.G.; León-Reina, L.; Aranda, M.A.G.: Rheological and hydration characterization of calcium sulfoaluminate cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, 34 (2012), pp. 684-691.
- [32] Zhang, L.; Glasser, F.P.: Investigation of the microstructure and carbonation of CSA-based concretes removed from service. *Cement and Concrete Research*, 35 (2005), pp. 2252-2260.
- [33] Gartner, E.; Li, G.: High-belite sulfoaluminate clinker: Fabrication process and binder preparation. in: W.P. Application (Ed.), 2006.
- [34] Winnefeld, F.; Lothenbach, B.: Hydration of calcium sulfoaluminate cements – Experimental findings and thermodynamic modelling. *Cement and Concrete Research*, 40 (2010), pp. 1239-1247.
- [35] Andac, M.; Glasser, F.P.: Pore solution composition of calcium sulfoaluminate cement. *Advances in Cement Research*, 11 (1999), pp. 23-26.
- [36] Kalogridis, D.; Kostoglou, G.C.; Ftikos, C.; Malami, C.: A quantitative study of the influence of non-expansive sulfoaluminate cement on the corrosion of steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*, 30 (2000), pp. 1731-1740.
- [37] Patent WO 2009156740 (A1): Novacem. Binder Composition. Novacem Limited [GB], Priority date: 30.12.2009.
- [38] Achternbosch, M.; Kupsch, Ch.; Nieke, E.; Sardemann, G.: Are new magnesia-based cements the future. Part 2: Novacem - an assessment of new developments. *ZKG*, 3 (2012), pp. 64 - 72.
- [39] Patent WO 2006018569 (A3): Hydraulic cement compositions based on precipitated carbonate from exhaust gases. CALERA CORP [US], Veröffentlichungstag: 24.05.2007.
- [40] Carter, T.; Devenney, M.: CO₂ embodied carbonate cement materials. *ECRA Conference - New cement and innovative binder technologies*, Barcelona (2011), Proceedings.
- [41] DeCristofaro, N.; Sahu, S.: Exploring the Chemical Properties and Performance Results of sustainable Solidia Cement™ and Solidia Concrete™. *Concrete*, 17 (2015), pp. 82-88.

[42] Heinz, D.; Urbonas, L.: Modifizierung zementgebundener Baustoffe durch gezielte Carbonatisierung. 19. IBAUSIL, Weimar 2015, Band 1, S. 139 - 151.

[43] P. Stemmermann, U. Schwelke, K. Garbev, G. Beuchle, H. Möller, Celitement - a sustainable prospect for the cement industry, Cement International, 8 (2010), pp. 52 - 66.

[44] Link, T., Bellmann, F.; Ludwig, H.-M. ; Ben Haha, M.: Reactivity and phase composition of Ca_2SiO_4 binders made by annealing of alpha-dicalcium silicate hydrate, Cement and Concrete Research, 67 (2015), pp 131-137.

[45] Link, T.; Bellmann, F.; Ludwig, H.-M.; Ben Haha, M.: Reaktivität von Niedertemperatur-Belit-Bindern. 19. IBAUSIL, Weimar 2015, Band 1, S. 1019 - 1030.

[46] Ludwig, H.-M.; Zhang, W.: Research review of cement clinker chemistry. Cement and Concrete Research, 78 (2015), pp. 24 - 37.

Autor

Prof. Dr.-Ing. Horst-Michael Ludwig

F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde

Bauhaus-Universität Weimar

Coudraystraße 11

99423 Weimar

Gesteinskörnung – von natürlicher bis rezyklierter Körnung

Wolfgang Breit, Julia Scheidt, Bianca Dornisch-Bund und Robert Adams

Zusammenfassung

Gesteinskörnungen stellen mengenmäßig den größten Bestandteil einer Betonzusammensetzung dar. Die Art, Beschaffenheit und Zusammensetzung der Gesteinskörnungen beeinflussen die Frisch- und Festbetoneigenschaften maßgeblich. Ihre Bedeutung für die Betonherstellung spiegelt sich in einem umfangreichen Regelwerk aus Produkt-, Prüf- und Anwendungsregeln. Neuere Entwicklungen vollziehen sich vor allem bei der Entwicklung moderner Hochleistungsbetone und unter dem Stichwort „umweltoptimierte Betone“ vor dem Hintergrund eines gewandelten Umweltbewusstseins und dem Bestreben der besseren Nutzung oder Schonung der vorhandenen Ressourcen. Der folgende Beitrag gibt einen Überblick über Entwicklungen bei Gesteinskörnungen und zeigt Entwicklungspotentiale am Beispiel von Hochleistungsbetonen und Betonen mit rezyklierten Gesteinskörnungen auf. Schwerpunkte der Ausführungen liegen auf der Beschreibung der Computertomographie bei der Prüfung von Gesteinskörnungen für Hochleistungsbetone sowie Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen und deren Einfluss auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften.

1 Einleitung

Gesteinskörnungen werden aus natürlichen Lagerstätten gewonnen (Lockergesteine oder gebrochene Festgesteine), künstlich hergestellt (z. B. Blähton, Blähglas usw.) oder fallen bei der Herstellung anderer Werkstoffe, wie z. B. Stahl, an und können ggf. nach entsprechender Aufbereitung als Gesteinskörnung verwendet werden. Seltener werden auch organische Stoffe (z. B. Polystyrol, Sägespäne) für spezielle Zwecke (z. B. Putze, Estriche) verwendet. Mit Blick auf eine Schonung der natürlichen Ressourcen und vor dem Hintergrund politischer und gesetzlicher Vorgaben gewinnt in jüngster Zeit auch die Verwendung rezyklierter (RC) Gesteinskörnungen bei hochwertigen Bauaufgaben zunehmende Bedeutung.

Gesteinskörnungen lassen sich nach unterschiedlichen Gesichtspunkten unterscheiden, z. B. nach Art und Gewinnung/Herkunft. Für die Anwendung im Beton oder im Straßenbau sind zudem die Einteilung nach dem Gefüge (dicht oder porig) und der Rohdichte bedeutsam.

Für die bautechnische Verwendung, insbesondere im Beton, sind die wichtigsten Eigenschaften genormt. Neben den Regelanforderungen sind auch erhöhte und ermäßigte Anforderungen möglich, die je nach Anwendungsfall festgelegt/vereinbart werden müssen, z. B. im Hinblick auf Anforderungen an die Dauerhaftigkeit (Frostbeständigkeit, Verschleißbeständigkeit, Chloridgehalt, leichtgewichtige organische Verunreinigungen) oder bei Sichtbetonanforderungen.

Besondere Anforderungen gelten darüber hinaus bei der Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen aber auch bei Hochleistungsbetonen und Hochleistungsmörteln (UHPC, UHPM), um die höheren Anforderungen an die Frisch- und Festbetoneigenschaften gewährleisten zu können.

Da Gesteinskörnungen mengenmäßig bis zu etwa 70 Vol.-% üblicher Betonzusammensetzungen ausmachen, werden viele Betoneigenschaften maßgeblich von den Eigenschaften der Gesteinskörnung beeinflusst.

Frischbetoneigenschaften wie Verarbeitbarkeit, Entmischungsneigung und Bluten hängen dabei nicht nur von der Art der Gesteinskörnung sondern insbesondere von der Kornform, der Oberfläche und der Korngrößenverteilung einschließlich dem Mehlkorngesamt ab.

Die Form der Gesteinskörnung soll möglichst gedungen (kugelig) sein. Bei gleicher Zementleimzusammensetzung ist Beton mit kugelig geformter Körnung leichter zu verarbeiten und zu verdichten als Beton mit länglich bzw. plattig geformten Gesteinskörnern. Die Oberfläche von gebrochener Körnung ist aufgrund der Rauigkeit größer als die eines natürlich gerundeten Kieses. Die größere Oberfläche führt bei Splitten für gleiche Verarbeitbarkeit zu einem höheren Wasseranspruch gegenüber natürlich gerundetem Korn.

Die Korngrößenverteilung bestimmt, neben der Kornform und der Kornoberfläche, die Frischbetoneigenschaften und den Wasseranspruch für eine verarbeitbare Frischbetonkonsistenz. Grobkörnige Gesteinskörnungen und Gesteinskörnungen mit

größerem Größtkorn besitzen einen kleineren Wasseranspruch und je Volumeneinheit eine geringere Oberfläche, die mit Zementleim benetzt werden muss, als feinkörnige. Zu grobkornreiche Mischungen sind schlechter zu verarbeiten und neigen stärker zur Entmischung. Nimmt die Gesteinskörnung in nennenswertem Maße durch Saugen Wasser auf, so ist diese Wasseraufnahme zusätzlich zu berücksichtigen. Dies ist insbesondere bei leichten und rezyklierten Gesteinskörnungen von Bedeutung.

Festbetoneigenschaften wie Rohdichte, Festigkeit, Verformungseigenschaften und Dauerhaftigkeit des Betons werden ebenfalls in erheblichem Maße durch die Eigenschaften der Gesteinskörnungen beeinflusst. Darüber hinaus hängen diese aber auch von den Eigenschaften des Zementsteins und dem Haftverbund zwischen Gesteinskörnung und Zementstein ab.

Bei Normalbeton ist die Art der verwendeten Primärgesteinskörnung, abgesehen von porösen Sand- oder Kalksteinen, für die Festigkeit des Betons ohne Bedeutung, da deren Festigkeit und Steifigkeit in der Regel höher liegt als die Matrixfestigkeit. Erst wenn sich die Steifigkeits- und Festigkeitsverhältnisse so verschieben, dass die Gesteinskörnung weniger steif und fest ist als die Zementsteinmatrix (wie z. B. bei leichter und teilweise auch bei rezyklierter Gesteinskörnung), bestimmt die Kornfestigkeit im Wesentlichen die Betondruckfestigkeit.

Durch eine Optimierung der Korngrößenverteilung kann die Packungsdichte erhöht werden. So kann eine gleichmäßigere Kraftübertragung und ein homogeneres, dichteres Betongefüge erreicht werden, was sich auf die Festigkeit und die Dauerhaftigkeit positiv auswirkt.

Weiterhin haben die Oberfläche der Gesteinskörnung und der davon abhängige Haftverbund zwischen Gesteinskörnung und Zementsteinmatrix hohen Einfluss auf die Festigkeit (Biege- und Spaltzugfestigkeit) des Gesamtsystems. Bei gebrochenen Gesteinskörnungen ist die Biege- und Spaltzugfestigkeit bei gleicher Druckfestigkeit ca. 10 % bis 20 % größer als bei einem vergleichbaren Kiesbeton. Auch auf den Elastizitätsmodul des Betons hat die Gesteinskörnung großen Einfluss. Für Betone mit sehr hohen Anforderungen an den Elastizitätsmodul werden vielfach Splitte aus „Hartgestein“, also gebrochene Gesteine, mit einer hohen Kornfestigkeit eingesetzt.

2 Entwicklungen

Da Gesteinskörnungen volumenmäßig den größten Bestandteil des Betons ausmachen, ist es nicht verwunderlich, dass sie bereits in den Anfängen der Betontechnologie Gegenstand systematischer wissenschaftlicher Untersuchungen waren.

In diesem Zusammenhang sind die Amerikaner Fuller und Thompson zu nennen, deren Überlegungen zur Zusammensetzung eines zweckmäßigen Korngemischs mit möglichst dichtem Korngerüst und geringer Oberfläche bereits 1907 zur Aufstellung der sogenannten Fuller-Parabel führten aber auch die Arbeiten von Abrams, der 1918 erstmalig den Feinheitsmodul als Kennwert für die Gesteinskörnung definierte. Auf deutscher Seite war es Otto Graf, dessen Arbeiten zur Erstellung der noch heute gültigen Regelsieblinien und Sieblinienbereiche führten, die erstmalig 1932 in DIN 1045 aufgenommen wurden [1].

Daneben spiegeln sich das zunehmende Bewusstsein um die Bedeutung der Gesteinskörnung für die Frisch- und Festbetoneigenschaften und das zunehmende betontechnologische Wissen erkennbar in der Entwicklung der Normung wieder.

Forderten die „Vorläufigen Leitsätze für die Vorbereitung, Ausführung und Prüfung von Eisenbetonbauten“ von 1904 [2] und die „Bestimmungen des Königlich Preußischen Ministeriums der öffentlichen Arbeiten für die Ausführung von Konstruktionen aus Eisenbeton bei Hochbauten“ von 1907 [2] noch lediglich eine grundsätzliche Eignung von Sand, Kies und sonstigen Gesteinskörnungen (früher „Zuschläge“) für die Betonbereitung und den beabsichtigten Verwendungszweck sowie eine Beschränkung des Größtkorndurchmessers im Hinblick auf den Abstand der „Eiseneinlagen“, so enthielten die „Bestimmungen für die Ausführung von Bauwerken aus Eisenbeton“ des Deutschen Ausschusses für Eisenbeton von 1916 und 1925 [2] bereits Hinweise auf eine zweckmäßige Korngrößenverteilung („geringer Hohlraumgehalt“) und die Dauerhaftigkeit („keine schädlichen Beimengungen“, „Wetterbeständigkeit“).

In Verbindung mit der Aufnahme von Sieblinien für den Sand und das gesamte Gesteinskörnungsgemisch in die novellierte Fassung der „Bestimmungen des Deutschen Ausschusses für Eisenbeton“ von 1932 [2] wurden auch Siebversuche zur Prüfung der Kornzusammensetzung sowie die Festlegung einer „Zweckmäßigen Körnung der Zuschläge“ durch Versuche vor Baubeginn und eine regelmäßige Überprüfung während der Bauausführung vorgeschrieben. Galt dies zunächst nur für „wichtige Bauwerke“ und die Verwendung von „flüssigem Beton“, so wurde der Prüfumfang in der Fassung von 1943 [2] bereits zusätzlich von der Güte des herzustellenden Betons abhängig gemacht.

1947 wurde mit DIN 4226 „Vorläufige Richtlinien für die Lieferung und Abnahme von Betonzuschlagstoffen aus natürlichen Vorkommen“ [3] erstmalig eine eigenständige Norm für Zuschläge/Gesteinskörnungen eingeführt, in der Anforderungen im Hinblick auf die Verwendung im Beton festgeschrieben waren. Diese enthielt Mindestanforderungen im

Hinblick auf die Kornzusammensetzung, den zulässigen Anteil an Über- und Unterkorn, die Kornform, schädliche Bestandteile, wie mehlfine Stoffe, Stoffe organischen Ursprungs und Gehalt an Schwefelverbindungen sowie die Gesteinseigenschaften, wie Festigkeit, Frostbeständigkeit und Hinweise auf die entsprechenden Prüfungen bzw. Prüfvorschriften. Gesteinskörnungen für Leichtbeton waren im Gegensatz zu späteren Fassungen noch nicht Gegenstand dieser Norm. Stattdessen wurde vor dem Hintergrund der unmittelbaren Nachkriegszeit auf DIN 4163 „Ziegelsplittbeton, Bestimmungen für die Herstellung und Verwendung“ verwiesen.

Die Inhalte der einschlägigen Vorschriften wurden seitdem parallel zur fortschreitenden Erkenntnis betontechnologischer Zusammenhänge angepasst und erweitert. So wurden u. a. in DIN 1045:1972 neue Sieblinienbereiche für Korngemische mit Größtkorn 8 mm, 16 mm, 31,5 mm und 63 mm, unstetige Kornzusammensetzungen und Obergrenzen für die zulässigen Höchstsandgehalte eingeführt und zur Einhaltung dieser Anforderungen die nach Korngruppen getrennte Anlieferung und Zugabe bei der Betonherstellung vorgeschrieben. Lediglich für Betone bis zu einer Güteklasse B_n 250 war auch „werksgemischter Betonzuschlag“ zugelassen [4].

Tabelle 1 zeigt die Entwicklung der einschlägigen Norm DIN 4226 mit Anforderungen an die Gesteinskörnungen für die Herstellung von Beton und Mörtel, Tabelle 2 die aktuellen Normen für Gesteinskörnungen für die Betonherstellung.

Tab. 1: Historie der Normreihe DIN 4226

Norm	Titel
DIN 4226 (1947-07)	Vorläufige Richtlinien für die Lieferung und Abnahme von Betonzuschlagstoffen aus natürlichen Vorkommen
DIN 4226 Teile 1-3 (1971-01) (1971-12)	Zuschlag für Beton
DIN 4226 Teile 1-4 (1983-04)	Zuschlag für Beton
DIN 4226 Teile 1 und 2 (2001-07) (2002-02)	Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel
DIN 4226-100 (2002-02)	Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel, Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen
DIN 4226-101 und -102 (2017-08)	Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620, Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen; Teil 102: Typprüfung und werkseigene Produktionskontrolle

Tab. 2: Aktuelle Normen für Gesteinskörnungen für die Betonherstellung

Norm	Titel
DIN EN 12620 (2003-04) Ber. 1 (2004-12)	Gesteinskörnungen für Beton
DIN EN 12620 (2008-07)	Gesteinskörnungen für Beton
DIN EN 12620 (2013-07) zurückgezogen	Gesteinskörnungen für Beton
DIN EN 13055-1 (2002-02) Ber. 1 (2004-12)	Leichte Gesteinskörnungen
DIN EN 13055-1 (2016-11)	Leichte Gesteinskörnungen Teil 1: Leichte Gesteinskörnungen für Beton, Mörtel und Einpressmörtel

Die aktuellen Vorschriften stellen in Abhängigkeit von der vorgesehenen Verwendung eine Vielzahl von Anforderungen an die geometrischen (Korngruppe, Kornzusammensetzung), physikalischen und chemischen Eigenschaften von Gesteinskörnungen. Die Beurteilung der Eignung von Gesteinskörnungen für die Betonherstellung erfolgt bei der Verwendung für Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton auf der Grundlage von DIN EN 12620, DIN EN 206-1 und DIN 1045-2:2008-07 bzw. bei der Anwendung im Straßenbau von TL Gestein-StB (Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau) bzw. ZTV Beton-StB 07.

Besondere Anforderungen und Prüfverfahren sind in weiteren Anwendungsregeln festgeschrieben, z. B. den DAfStb-Richtlinien „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton“ und „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“.

Heute sind Gesteinskörnungen hochwertige, durch die Baustoffüberwachungsorganisationen Bundesüberwachungsverband Kies, Sand und Splitt e.V. (BÜV KSS) überwachte Baustoffe, für deren Prüfung mit den Normen der Reihen DIN EN 932, DIN EN 933, DIN EN 1097, DIN EN 1367 und DIN EN 1744 ein umfangreiches Regelwerk zur Verfügung steht.

Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Gesteinskörnungen vollziehen sich unter dem Stichwort „umweltoptimierter Beton“ [5] vor dem Hintergrund eines begrenzten Rohstoffangebots in Verbindung mit geänderten gesellschaftlichen, politischen Rahmenbedingungen und einem zunehmenden Bewusstsein für Umweltfragen einerseits sowie der Entwicklung moderner Hochleistungsbetone andererseits.

Während bei der Entwicklung von Hochleistungsbetonen die Packungsdichte aber auch die Verbesserung der rheologischen Eigenschaften im Fokus des Interesses stehen, zielen ökologische Neuerungen auf die Schonung vorhandener Ressourcen ab, z. B. durch eine bessere Nutzung der vorhandenen Vorkommen durch den Einsatz sandreicher Betone oder aber die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen.

Um das hohe Optimierungspotential im Hinblick auf verbesserte Werkstoffeigenschaften nutzen zu können, müssen im Fein- und Feinstsandbereich Prüfmethode entwickelt werden, die in der traditionellen Baustoffprüfung bisher nicht zur Verfügung stehen. Die Standardprüfverfahren, die die wesentlichen Eigenschaften von Gesteinskörnungen beschreiben, sind vielfach nur für grobe Gesteinskörnungen anwendbar. Hier sind neue Analysemethoden erforderlich, die es möglich machen auch feine Gesteinskörnungen besser zu charakterisieren und zu optimieren. Ein vielversprechendes Werkzeug hierfür könnte die Anwendung der Computertomographie (CT) sein.

Demgegenüber sind ökologische Entwicklungen vor dem Hintergrund geänderter gesellschaftlicher und politischer Rahmenbedingungen zu sehen. So stehen Gesteinskörnungs- und Betonhersteller in Regionen mit sogenannten Überschusssanden, d. h. einem ausgesprochenen Mangel an grobkörnigen Gesteinskörnungen, vor der Herausforderung, die überschüssigen Sandanteile, die bisher nach der Aufbereitung wieder verkippt werden müssen (unökologisch, unwirtschaftlich), einer hochwertigen Verwendung in sogenannten sandreichen Betonen zuführen zu können [6].

Darüber hinaus steht auch der Abbau primärer Gesteinskörnungen vor der Herausforderung, dass neue Abbaugenehmigungen nicht oder nur mit großen Hürden erteilt werden, was auf dem Markt zu einer Verknappung und teilweise eingeschränkter Verfügbarkeit der Primärmaterialien führen kann [7, 8]. Aufgrund dieser Entwicklung sowie aufgrund des steigenden Interesses der öffentlichen Hand an der Verwendung von Recyclingbeton, rücken die rezyklierten Gesteinskörnungen als Alternative zu primärer Gesteinskörnung als Zukunftsthema in den Fokus der Betonhersteller [9]. Die Verwendung dieser Gesteinskörnungen ist, wie im Folgenden gezeigt werden soll, für die am meisten produzierten Betonfestigkeitsklassen und Betonsorten möglich. Dabei muss jedoch den charakteristischen Besonderheiten der rezyklierten Gesteinskörnung in der Betontechnologie im Rahmen der Verfahrenswege Rechnung getragen werden. Da sie in ihrer Zusammensetzung in Abhängigkeit von ihrer Gewinnung stark variieren, ist die Eingrenzung der stofflichen Zusammensetzung eine wichtige Voraussetzung für genügend gleichmäßige und damit kalkulierbare Eigenschaften.

Im Folgenden sollen vor dem Hintergrund der geschilderten Zusammenhänge der Einsatz der Computertomographie bei der Analyse von Gesteinskörnungen für die Herstellung von Hoch- und Ultrahochleistungsbetonen sowie die Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung im Hinblick auf die besonderen Herausforderungen und das bestehende Optimierungspotential näher vorgestellt werden.

3 Herausforderungen und Chancen

3.1 Gesteinskörnungen für Hochleistungsbetone - Neue Prüfmethode

3.1.1 Besondere Anforderungen an Gesteinskörnung für die Herstellung von Hochleistungsbetonen

Bei Hochleistungsbetonen sind die Eigenschaften der Gesteinskörnung in besonderem Maße bedeutend für die erreichbaren Betoneigenschaften. Um zielsicher hohe Festigkeiten über 100 MPa zu erreichen, müssen auch Gesteinskörnungen mit hoher Festigkeit und hohem Elastizitätsmodul eingesetzt werden [10].

Aus diesem Grund kommen bei der Herstellung hochfester und ultrahochfester Betone (HPC, UHPC) bevorzugt gebrochene Festgesteine zum Einsatz [10]. Mit dem Einsatz gebrochener Körnung wird auch im Allgemeinen ein höherer Elastizitätsmodul als mit runder Körnung erreicht, vor allem wenn dichtes Gestein wie z. B. Basalt verwendet wird [10]. Neben der Eigenfestigkeit der Gesteinskörnung sind auch ein dichtes Gefüge sowie die Oberflächenbeschaffenheit der Gesteinskörnung wichtige Voraussetzungen für das Erreichen hoher Festigkeiten.

Die Oberflächenbeschaffenheit der Körner beeinflusst dabei das Verhalten des Werkstoffs in der Kontaktzone Gesteinskorn-Zementmatrix, welche grundsätzlich bei Normalbetonen die schwächste Stelle im System darstellt. Mäßig raue Kornoberflächen verbessern den Verbund an dieser Stelle im Zusammenspiel mit dem zumeist eingesetzten Silikastaub.

Im Hinblick auf die erzielbare Betonfestigkeit ist darüber hinaus eine hohe Packungsdichte der Gesteinskörnung, die nur mit zielgerichteter Kornabstufung funktioniert, unabdingbar. Die Zusammensetzung der Gesteinskörnung für die Korngruppen ≤ 2 mm sollte nah an der Regelsieblinie B liegen und für die Korngruppen > 2 mm nahe der Regelsieblinie A [10]. Von besonderer Bedeutung ist dabei insbesondere der Kornbereich $< 0,5$ mm, da dieser Bereich wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung der Festigkeitseigenschaften hat [11].

Eine günstige Kornabstufung wirkt sich darüber hinaus auch positiv auf den Wasseranspruch aus, der möglichst gering gehalten werden soll. Eine gut abgestufte Körnung erfordert wegen des geringeren

Hohlraumgehaltes weniger Bindemittel, um sowohl die erforderlichen Verarbeitungseigenschaften als auch Festbetoneigenschaften zu erreichen [11]. Dazu trägt auch der Einsatz möglichst gedrungener Körnung bei [10].

Da immer mehr Hochleistungswerkstoffe lediglich feinere Körnungen beinhalten, um z. B. auch die Herstellung filigraner Bauteile zu ermöglichen, kann gerade für Hochleistungsbetone, wie Selbstverdichtende Betone oder ultrahochfeste Betone eine genauere Klassifizierung der geometrischen Eigenschaften der Gesteinskörnung insbesondere im Fein- und Feinstkornbereich dazu beitragen, vorhandene Potentiale besser ausnutzen zu können.

3.1.2 Prüfverfahren

Die standardisierten Verfahren zur Bestimmung der geometrischen Eigenschaften von Gesteinskörnungen umfassen zum einen die Bestimmung der Korngrößenverteilung nach DIN EN 933-1. Dieses Verfahren ist sowohl für feine als auch für grobe Körnungen geeignet, wobei die Abstufung der Siebe im Feinbereich deutlich abnimmt. Dies ist allein der technischen Machbarkeit der Siebung geschuldet. Zum anderen können nach DIN EN 933-3 und -4 die Plattigkeitskennzahl (FI) bzw. die Kornformkennzahl (SI) ermittelt werden. Diese Verfahren sind allerdings beschränkt auf Körnungen ≥ 4 mm. Mit Hilfe dieser beiden Kennzahlen lassen sich Körnungen gemäß ihrer Plattigkeit bzw. ihrer Abweichung von der Kugel- bzw. Würfelform geometrisch klassifizieren. Eine weitere Möglichkeit für die Abschätzung der Oberflächenbeschaffenheit bietet die Bestimmung des Fließkoeffizienten nach DIN EN 933-6. Die Norm gibt hier jeweils ein Verfahren für grobe und für feine Körnungen an. Die weiteren genormten Verfahren zur Bestimmung geometrischer Eigenschaften (Anteil von gebrochenen Körnern in grober Gesteinskörnung, Muschelschalengehalt, Einteilung der Bestandteile in grober rezyklierter Gesteinskörnung, DIN EN 933-5, -7, -11) sind ebenfalls lediglich bei groben Gesteinskörnungen (≥ 4 mm) anwendbar.

Um diese Lücken, insbesondere im Feinkornbereich, zu füllen, werden unterschiedliche nicht standardisierte zwei- und dreidimensionale bildgebende Methoden zur geometrischen Charakterisierung von Gesteinskörnungen aller Art eingesetzt.

Zu den zweidimensionalen bildgebenden Verfahren zählen u. a. die Fotografie (z. B. [12, 13]), Laserbeugung (vgl. u. a. [14, 15, 16]) oder auch Scanner unterschiedlicher Art (z. B. [17]). Dabei werden Projektionen der Körner erzeugt, anhand derer die weitere Analyse erfolgt. Nachteil dieser Methoden ist allerdings, dass ohne weiteren größeren Aufwand jeweils nur eine Projektion aus einer

Aufnahmerichtung erstellt wird. Dies führt dazu, dass bei diesen Verfahren die weitere Auswertung lediglich zweidimensionale Kennwerte ergibt.

Zur dreidimensionalen Erfassung der Körner gibt es ebenfalls Ansätze mit Laserbeugung [18, 19], allerdings beschränkt sich hier die Untersuchung jeweils auf ein Einzelkorn [19].

Um die geometrischen Eigenschaften von größeren Gesteinskörnungen zum einen genauer/feiner zu beschreiben bzw. eine geometrische Charakterisierung, die über die Bestimmung der Korngrößenverteilung hinausgeht, für feine Fraktionen erst einmal zu ermöglichen, kann die Computer Tomographie ein hilfreiches Verfahren darstellen, vgl. u. a. [20, 21, 22, 19, 23]. Vorteil bei dieser Methode ist die gleichzeitige Erfassung einer größeren Probe bei der Aufnahme, nicht nur die Analyse von Einzelkörnern. Allerdings werden bei den meisten Untersuchungen die Proben für die CT-Aufnahme zuvor präpariert, um eine Überlappung der Körner bei den Aufnahmen zu verhindern [20]. Zum Teil werden größere Körner auch hier einzeln tomographiert, kleinere mit Plastik umhüllt und gemeinsam in einem Gefäß tomographiert während noch kleinere Fraktionen z. B. in eine schwache Epoxid-Lösung untergemischt werden [24]. In [25] und [26] sind erste Ergebnisse für die Analyse von CT-Aufnahmen einfacher Schüttungen grober Gesteinskörnungen gezeigt. Die Trennung der einzelnen Körner wird hier per Bildbearbeitung (erfolgt mit MAVIparticle, einer vom Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik entwickelten Software) durchgeführt.

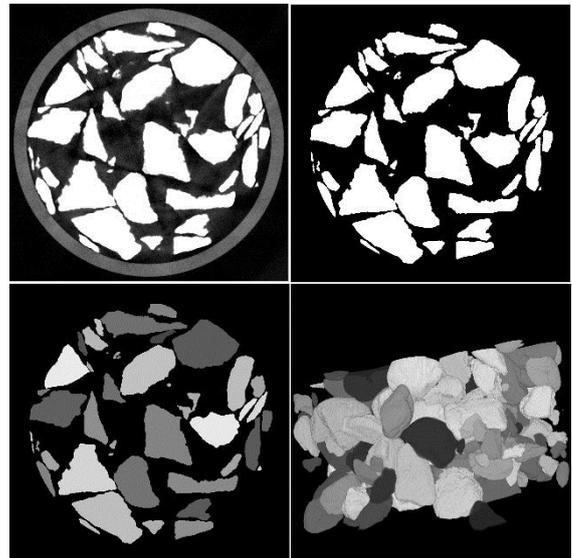


Abb. 1: Links oben: rekonstruiertes Graustufen CT-Schnittbild; rechts oben: binarisiertes Schnittbild; links unten: segmentiertes Schnittbild; rechts unten: dreidimensionale Visualisierung [25]

In Abbildung 1 ist das grobe Vorgehen der Bildbearbeitung anhand einer Probe erläutert. Grundlage ist die auf der CT-Aufnahme basierende Graustufen-Rekonstruktion der Probe (Abbildung 1 oben links). Anhand dieser wird per Bildverarbeitung entschieden, welche Voxel (dreidimensionale Pixel) zu der Körnung gehören (weiß in Abbildung 1 rechts oben) und welche nicht (schwarz). Um in der weiteren Analyse Kenndaten für jedes einzelne Korn zu erhalten, werden die Körner im Folgenden getrennt - das einzelne Korn ist an der jeweils anderen Farbe zu erkennen (Abbildung 1 links unten, hier als grau Abstufung dargestellt). Anschließend können die Körner dreidimensional visualisiert werden (Abbildung 1 rechts unten).

Mit den nun getrennt zu betrachtenden Körnern wird anschließend die Partikelanalyse mit MAVIparticle durchgeführt. Auf Basis der so gewonnenen Daten können die Körner unterschiedlich mathematisch modelliert werden [25] und anschließend kann eine Auswertung angelehnt an die aktuell geltende Normung erfolgen. In [25] werden zunächst die CT-Daten mit MATLAB ausgewertet, um anschließend die Korngrößenverteilung zu erstellen sowie die Plattigkeitskennzahl (FI) und Kornformkennzahl (SI) zu bestimmen. In Abbildung 2 ist beispielhaft die im Labor ermittelte Korngrößenverteilung der auf Basis der CT-Aufnahmen ermittelten Korngrößenverteilung eines Kieses der Korngruppe 4/8 gegenübergestellt.

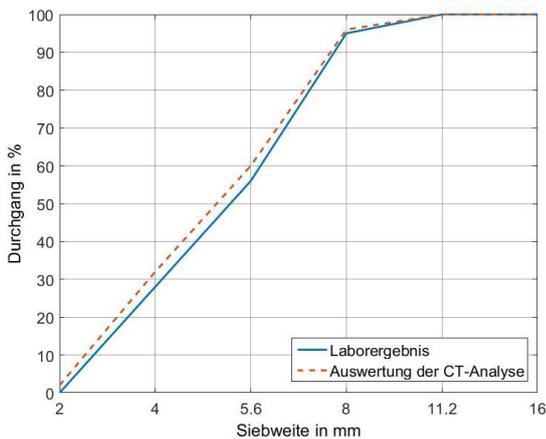


Abb. 2: Vergleich der Korngrößenverteilungen eines Kieses der Korngruppe 4/8: Laborergebnis (durchgezogene Linie) und CT-Analyse (gestrichelte Linie) [25]

Abbildung 3 zeigt den Vergleich des Laborergebnisses mit den CT-basierten Ergebnissen der Korngrößenverteilung eines Sandes der Korngröße 0,25-0,5 mm. Auch hier ist, wie bei den groben Fraktionen, eine einfache Schüttung tomographiert worden und auch hier ist eine gute Übereinstimmung zu erkennen.

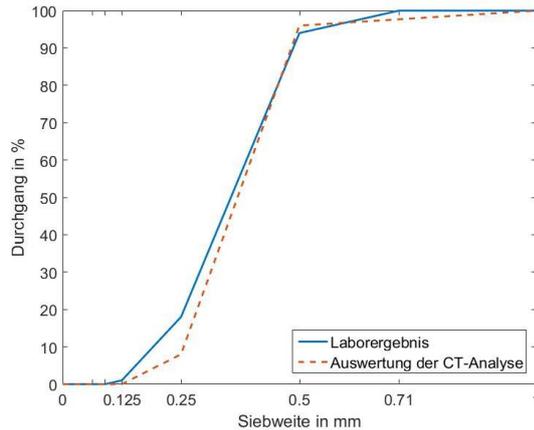


Abb. 3: Vergleich der Korngrößenverteilungen eines Sandes 0,25/0,5: Laborergebnis (durchgezogene Linie) und CT-Analyse (gestrichelte Linie)

Mit Verfeinerung und Vereinfachung bzw. Automatisierung der Bildbearbeitungsschritte kann die CT in Zukunft ein hilfreiches Werkzeug für die Form- und Größenanalyse darstellen. Vorteilhaft bei dieser Art der Charakterisierung ist vor allem die Erweiterung des Anwendungsbereichs auf die feinen Fraktionen der Gesteinskörnungen. Auch können in Bezug auf die bei Hochleistungsbetonen höheren Ansprüche an die Abstufung der Kornbänder viel feinere Abstufungen der Siebweiten eingesetzt werden. Jede beliebige Siebweite und auch beliebig viele Siebweiten zur Erstellung von Sieblinien ist auf diese Weise möglich. So kann schon beim Klassifizieren der Sande zielgerichtet gesteuert werden. Darüber hinaus eröffnet diese Prüfmethode auch Wege der Formanalyse für feine Körnungen, was zu einer optimierten Einstellung der Eigenschaften der Endprodukte beitragen kann.

Auch im Bereich der rezyklierten Gesteinskörnung kann die CT ein hilfreiches Werkzeug darstellen. So kann nicht nur die Form und Größe rezyklierter Gesteinskörnung ermittelt werden, auch die Anteile des natürlichen Korns und der anhaftenden Zementsteinmatrix sind auf CT-Aufnahmen zu erkennen (vgl. Abbildung 4).

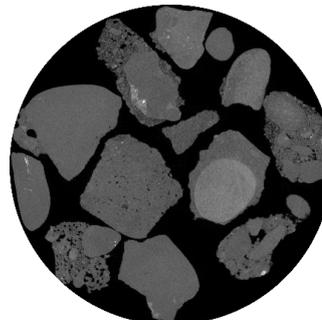


Abb. 4: Schnittbild einer CT-Aufnahme von rezyklierter grober Gesteinskörnung

3.2 Rezyklierte Gesteinskörnungen - Neue Anwendungsgrenzen und Perspektiven

3.2.1 Eigenschaften der rezyklierten Gesteinskörnung

Als rezyklierte Gesteinskörnungen werden gemäß der Definitionen in DIN EN 12620:2008-07 und DIN 4226-101:2017-08 „Gesteinskörnungen aus aufbereitetem anorganischem Material, welches zuvor als Baustoff eingesetzt war“, bezeichnet. Die Bezeichnung ist ein Sammelbegriff für rezyklierten Splitt und rezyklierten Brechsand. Rezyklierte Gesteinskörnungen bestehen größtenteils aus gebrochenen mineralischen Bauabfällen, stammen folglich also in der Regel nicht aus einem homogenen Vorkommen. Aus diesem Grund kann die rezyklierte Gesteinskörnung gegenüber natürlicher Gesteinskörnung in ihrer stofflichen Zusammensetzung und ihren Eigenschaften stark schwanken.

Rezyklierte Gesteinskörnungen weisen im Vergleich zu natürlicher Gesteinskörnung charakteristische Eigenschaften auf, die sich auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften auswirken. Folgende Eigenschaften der Gesteinskörnung sind dabei von Bedeutung:

- Porosität/Porengrößenverteilung
- Wasseraufnahme
- Kornfestigkeit
- Elastizität
- Konstanz der Eigenschaften

Rezyklierte Gesteinskörnungen besitzen, verglichen mit primären Gesteinskörnungen, allgemein eine höhere Porosität und dadurch bedingt eine geringere Rohdichte.

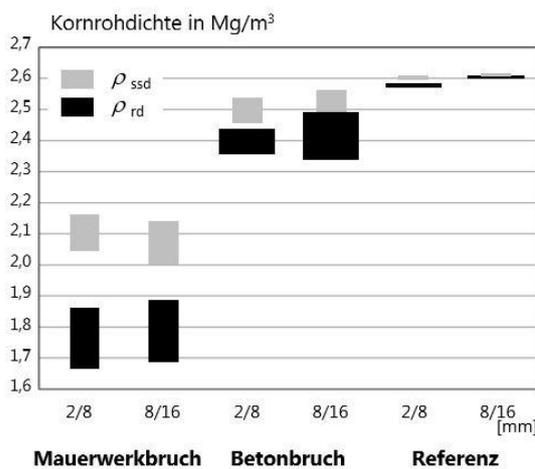


Abb. 5: Streubreiten der Rohdichten im wassergesättigten und im ofentrockenen Zustand, ermittelt nach DIN EN 1097-6 [27, 46]

Mit steigendem Anteil an Mauerziegeln verringert sich die Rohdichte und erhöht sich die Porosität gegenüber rezyklierten Gesteinskörnungen aus

reinem Betonbruch (vgl. Abbildung 5). Bei reinen Betonsplitten ist die Porosität der anhaftenden alten Zementsteinmatrix von großem Einfluss auf die Porosität der rezyklierten Gesteinskörnung (siehe Abbildung 6).



Abb. 6: Betonsplitt ca. 16 mm Korngröße

Die Wasseraufnahme rezyklierter Gesteinskörnung ist höher als die von Primärgesteinskörnung. Bei feiner Gesteinskörnung ist sie größer als bei der groben Körnung. Mauerwerksabbruch macht, nach Betonbruch den zweiten Hauptanteil an rezyklierter Gesteinskörnung aus. Dieses Material besitzt, verglichen mit Betonbruch, nochmals eine deutlich höhere Porosität und eine dadurch bedingt deutlich geringere Rohdichte sowie eine höhere Wasseraufnahme. Je größer der Anteil an Mauerwerk/Ziegel/Backstein an der rezyklierten Gesteinskörnung, desto höher die Wasseraufnahme (vgl. Abbildung 7). Die größte Wasseraufnahme erfolgt innerhalb der ersten 10 Minuten. Abhängig von der Porosität des Ausgangsmaterials nimmt rezyklierte Gesteinskörnung innerhalb der ersten 10 Minuten nach Wasserkontakt 50 % bis 98 % der Wassermenge auf, die sie innerhalb von 24 Stunden aufnehmen kann.

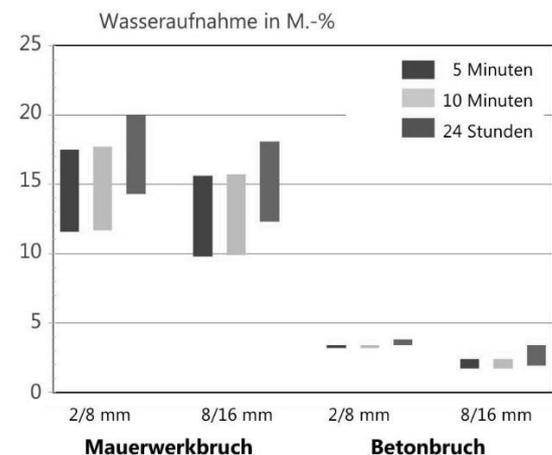


Abb. 7: Streubreiten der Wasseraufnahme über die Zeit, ermittelt nach DIN EN 1097-6 [27, 46]

Allgemein ist mit starken Schwankungen von bis zu 20 M.-% der stofflichen Zusammensetzung zu rechnen, da die Ausgangsmaterialien nicht aus einheitlichen Vorkommen stammen, sondern von Region, Alter, Gebäudetyp, Abbruch- und Aufbereitungstechnik abhängig sind [28].

Bei der Herstellung kann mit einem selektiven Rückbau bereits deutlich Einfluss auf die Qualität der rezyklierten Gesteinskörnung genommen werden. Nach dem Abbruch erfolgen eine weitere Sortierung und anschließend der Brechprozess. Dieser kann mittels Backen-, Kegel-, Walzen-, Prall- oder Schlagwalzenbrechern erfolgen. Am häufigsten finden bei der Stoffaufbereitung Prall- und Backenbrecher Verwendung [29]. Je nach Ausgangsfestigkeit des zu brechenden Betons und dem eingesetzten Brechertyp fällt ein erheblicher Anteil der gewonnenen Gesteinskörnung als Brechsand < 4 mm an. Es muss mit einem Anteil von ca. 20–40 M.-% < 4 mm gerechnet werden [29].

Die Kornform sollte möglichst kubisch sein, um eine hohe Packungsdichte der Betonmischung zu erreichen und somit den Bindemittelbedarf zu minimieren. Die Kornform kann durch den eingesetzten Brechertyp maßgeblich beeinflusst werden.

Die Kornfestigkeit, die indirekt über den Druckwert, ermittelt nach DIN EN 13055, abgeschätzt werden kann, hängt wesentlich von der Ausgangsfestigkeit der Zementsteinmatrix ab [30]. Bei der größeren Körnung 8/16 mm ist sie niedriger als bei der feineren Körnung 4/8 mm. Die Kornfestigkeit von Mauerwerksplitten ist deutlich geringer als diejenige von Betonbruch [31, 32]. Die geringere Kornfestigkeit im Vergleich zu Primärgesteinen wirkt sich auf die Betondruckfestigkeit auch bei vollständigem Ersatz der groben Gesteinskörnung nicht aus, solange die Zusammensetzung der rezyklierten Gesteinskörnung die Regelwerkanforderungen erfüllt.

Der Frostwiderstand der RC-Gesteinskörnung ist mit Ausnahme von reinem Mauerwerksplitt sehr gering [32, 28, 33]. Die Anforderungen an die Frostbeständigkeit der rezyklierten Gesteinskörnung, die sich aus den XF-Expositionsklassen ergeben (F4, MS₂₅, F2, MS₁₈), können von den meisten RC-Körnungen nicht erfüllt werden, jedoch haben die aus der rezyklierten Gesteinskörnung hergestellten Betone eine ausreichende Frostbeständigkeit. Für rezyklierte Gesteinskörnungen empfiehlt sich daher, die Frostbeständigkeit direkt über den zulässigen Nachweis im Betonversuch zu führen.

Die Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen für die Betonherstellung ergeben sich aus den Regelungen der DIN EN 12620 sowie der DAFStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ in Verbindung mit DIN EN 206-1 und DIN 1045-2.

Die Bestandteile rezyklierte Gesteinskörnung werden gemäß Tabelle 20 der DIN EN 12620 kategorisiert. Dabei wird zwischen den Bestandteilen gemäß Tabelle 3 unterschieden und entsprechend der massenmäßigen Anteile der Stoffe in Kategorien eingeteilt.

Tab. 3: Bestandteile rezyklierte Gesteinskörnung nach DIN EN 12620

Bestandteile	Beschreibung
Rc	Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton
Ru	Ungebundene Gesteinskörner, Naturstein, hydraulisch gebundene Gesteinskörner
Rb	Mauer- und Dachziegel aus gebranntem Ton, Kalksandsteine, Gasbetonsteine (nicht schwimmend)
Ra	Bitumenhaltige Materialien
X	Bindige Materialien (d. h. Ton, Erde), (eisenhaltige und nicht eisenhaltige) Metalle, nicht schwimmendes Holz, Kunststoff, Gummi, Gips
Rg	Glas
FL	Schwimmendes Material im Volumen

Die Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung rezyklierte Gesteinskörnungen unterliegen nationalen Regelungen. Für Deutschland werden gemäß Tabelle 1 der DIN 4226-101:2017-08 vier Typen rezyklierte Gesteinskörnung, entsprechend den nach DIN EN 12620 anzugebenden Kategorien der Bestandteile rezyklierte Gesteinskörnungen, unterschieden. Für die Verwendung in der Betonherstellung nach DIN EN 206-1 und 1045-2 dürfen derzeit in Deutschland rezyklierte Gesteinskörnungen vom Typ 1 und Typ 2 unter Ausschluss der feinen Gesteinskörnung < 2 mm verwendet werden.

Soll rezyklierte Gesteinskörnung für die Herstellung von Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 verwendet werden, so sind die Anforderungen gemäß der Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ zu erfüllen. Für die zulässigen Typen 1 und 2 gibt das vorgenannte Regelwerk die Grenzwerte der stofflichen Zusammensetzung vor. Diese sind in Tabelle 4 dargestellt.

Zudem muss rezyklierte Gesteinskörnung, die für die Verwendung in der Betonherstellung produziert wird, die in der DAFStb-Richtlinie zusammengefassten Regelanforderungen und zusätzlichen Anforderungen erfüllen.

Tab. 4: Grenzwerte der stofflichen Zusammensetzung rezyklierter Gesteinskörnung nach DAfStb-Richtlinie, Tabelle 1

Bestandteile	Typ 1	Typ 2
Rc+ Ru	Rcu ₉₀	Rcu ₇₀
Rb	Rb ₁₀₋	Rb ₃₀₋
Ra	Ra ₁₋	Ra ₁₋
X + Rg	XRg ₁₋	XRg ₂₋
FL	FL ₂₋	FL ₂₋

Es dürfen nur rezyklierte Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620 verwendet werden, die keine umweltschädlichen Auswirkungen, insbesondere auf Boden und Grundwasser, haben. Die Grenzwerte für den Nachweis der Umweltverträglichkeit sind seit August 2017 in DIN 4226-101 geregelt.

Der Status Quo der Regelwerke zu Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung ist ausführlicher in [34] zusammengefasst.

3.2.2 Betonherstellung mit rezyklierten Gesteinskörnungen

Die höhere Porosität und damit verbundene höhere Wasseraufnahme führen dazu, dass im **Betonwurf** bei Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung in der Betonherstellung die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung zusätzlich zum Zugabewasser auszugleichen ist, um eine ausreichende Verarbeitbarkeit zu gewährleisten und den angestrebten Wasserzementwert zu realisieren und damit auch die Dauerhaftigkeitsanforderungen sicherzustellen. Dies wurde übereinstimmend z. B. in [35, 36, 37, 46] festgestellt. Hierzu wird an der Körnung im Allgemeinen die Wasseraufnahme im Pyknometerversuch ermittelt und darüber die zusätzlich erforderliche Wassermenge abgeschätzt, die in einer Betonmischung mit trockener Gesteinskörnung notwendig ist, um den angestrebten Wasserzementwert und die angestrebte Verarbeitbarkeit zu erzielen.

Gegenwärtig empfiehlt es sich, wie in [35], bei Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung auf der sicheren Seite liegend das Äquivalent der Wasseraufnahme in 10 Minuten, als zusätzliches Wasser zum normal errechneten Zugabewasser zur Betonzusammensetzung in den Mischprozess zu geben. Es ist jedoch zu beachten, dass der Feuchtegehalt der Gesteinskörnung zum Zeitpunkt der Verwendung bekannt sein muss und dieser auf das zusätzliche Wasser anzurechnen ist. Des Weiteren ist zu beachten, dass die Rohdichte der Gesteinskörnung aufgrund der hohen Wasseraufnahme feuchtebedingt stark schwankt. Das „Saugwasser“, das die Gesteinskörnung aufnimmt, wird im Mischungsentwurf üblicherweise massenteilig, nicht aber volumenmäßig berücksichtigt. Für den Mischungsentwurf empfiehlt es sich, für die Zielfestigkeit und den Wasserzementwert aufgrund der streuenden Eigen-

schaften ein Vorhaltemaß im oberen Bereich der praxisüblichen Empfehlungen für Normalbeton [38] zu wählen.

Die DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ deckt den Festigkeitsbereich bis Betondruckfestigkeitsklasse C 30/37, unter Einschränkung der möglichen Expositionsklassen und höchstzulässiger Anteile der rezyklierten Gesteinskörnung > 2 mm, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung, ab. Sie gewährleistet, dass die Eigenschaften der Betone, die mit dieser rezyklierten Gesteinskörnung hergestellt werden, denen eines Normalbetons gleicher Betondruckfestigkeitsklasse entsprechen. Somit sind auch hinsichtlich der Dauerhaftigkeit keine Einschränkungen durch die Verwendung der rezyklierten Gesteinskörnung zu erwarten. Zulässig ist rezyklierte Gesteinskörnung in Betonen der Expositionsklassen X0, XC1 bis XC4, XF1 und XF3 sowie XA1 einzusetzen.

Zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) in Beton gilt in Deutschland die DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie)“ in der derzeit gültigen Ausgabe vom Oktober 2013. Aus dieser Richtlinie ergeben sich für den Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung, insbesondere in feuchter und somit AKR-gefährdeter Umgebung, zusätzlich zu den Einschränkungen aus der vorgenannten Richtlinie für Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung, strenge Anforderungen und vorbeugende Maßnahmen, die das Auftreten von Alkalitreiben verhindern sollen. Rezyklierte Gesteinskörnungen dürfen für Bauteile in feuchter Umgebung, entsprechend der Klasse WF der Alkali-Richtlinie, nur verwendet werden, wenn die Herkunft der rezyklierten Gesteinskörnung bekannt ist und die im Altbeton enthaltene Gesteinskörnung eindeutig einer unbedenklichen Alkaliempfindlichkeitsklasse zugeordnet werden kann. Falls der Hersteller der rezyklierten Gesteinskörnung diesen schriftlich zu dokumentierenden Herkunftsnachweis hinsichtlich einer unbedenklichen Alkaliempfindlichkeitsklasse nicht erbringen kann, von diesem Fall ist im Allgemeinen auszugehen, so müssen die rezyklierten Gesteinskörnungen in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S eingeordnet und entsprechend gehandhabt werden. Damit gelten, gemäß der vorgenannten Alkali-Richtlinie, die vorbeugenden Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion, es sei denn, dass durch eine Untersuchung gemäß Anhang B der Alkali-Richtlinie die Einstufung dieser Gesteinskörnung in eine unbedenkliche Alkaliempfindlichkeitsklasse zweifelsfrei festgestellt wird. Soll ein Bauteil der Feuchtigkeitsklasse WA hergestellt werden (Bauteile mit Meerwassereinwirkung, Bauteile mit Tausalzeinwirkung, Bauteile von Industriebauten, landwirtschaftlichen Bauwerken mit

Alkalisalzeinwirkung) so ist dies ebenfalls möglich, wenn der Zementgehalt unterhalb von 350 kg/m^3 bleibt und gleichzeitig ein Zement mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt ((na)-Zement) zum Einsatz kommt. Alternativ kann für den letztgenannten Fall auch eine gutachterliche Stellungnahme durch eine fachkundige Person erstellt werden.

Auf die **Frischbetoneigenschaften** hat rezyklierte Gesteinskörnung, verglichen mit natürlicher Gesteinskörnung, mehrere unmittelbare Einflüsse. Die Frischbetonrohddichte von Beton mit RC Gesteinskörnung ist, abhängig von der Rohddichte der rezyklierten Gesteinskörnung, geringer als die von Betonen mit natürlicher Gesteinskörnung. Je höher der Anteil an ziegelhaltigem Material ist, desto geringer ist die Frischbetonrohddichte. Der Luftgehalt des Frischbetons, ermittelt im Druckausgleichsverfahren nach DIN EN 12350-7, ist höher als bei vergleichbaren Betonen mit Primärgesteinskörnung. Die höheren Werte rühren nicht von einer höheren Porosität des Zementsteins. Vielmehr werden im Druckausgleichsverfahren auch nicht wassergesättigte Poren der Gesteinskörnung mit erfasst [35], was aufgrund der hohen Porosität der Gesteinskörnung insbesondere bei Betonen mit Gesteinskörnung Typ 2 zu deutlich erhöhten Luftgehalten im Frischbeton führt. Hier ist der Korrekturfaktor für die Gesteinskörnung gemäß Anhang A der DIN EN 12350-7 bei der Beurteilung von Prüfergebnissen zu berücksichtigen. Wird die Wasseraufnahme der rezyklierten Gesteinskörnung in der Mischungszusammensetzung nicht ausreichend berücksichtigt, so kann es zu einem vorzeitigen Konsistenzverlust der Betone kommen. Es ist außerdem nachgewiesen, dass der Feuchtezustand der Gesteinskörnung Einfluss auf die Verarbeitbarkeit und die Festigkeit besitzt. Die genauen Ursachen hierfür sind nicht hinreichend bekannt. Nachgewiesen wurde in [39], dass ofentrockene Gesteinskörnung aus Betonbruch zu einer erhöhten Anfangskonsistenz und zu einem schnellen Absinken derselben führt. Auch ein Einfluss auf die Festbetoneigenschaften wurde gezeigt. Des Weiteren sind Ergebnisse veröffentlicht, die auf einen negativen Einfluss einer vollständig gesättigten Körnung auf die Festigkeit schließen lassen, da die Gesteinskörnung in Folge der Verdichtungsenergie einen Teil des Wassers abgab, der Beton stark blutete, das abgegebene Wasser die Kontaktzone zwischen Korn und Matrix durch eine lokale Erhöhung des Wasserzementwertes störte und den Haftverbund verringerte. Eine komplett trockene Gesteinskörnung wirkte sich ebenfalls negativ aus, da sie in ihrem Wasseraufnahmevermögen überschätzt wurde.

Für die Praxis empfiehlt sich daher, die Gesteinskörnung weder vollständig mit Wasser zu sättigen noch sie vollständig zu trocknen. Gesteinskörnung im praxisüblichen, lufttrockenen Zustand führt bei

gleichem Gesamtwasser zu den höchsten Festigkeitsergebnissen [39]. Der Feuchtegehalt der Gesteinskörnung sollte, gemäß der Vorgaben in der DAfStb-Richtlinie für Beton mit rezyklierte Gesteinskörnung, bestimmt und auf das Gesamtwasser, bestehend aus Zugabewasser und dem Äquivalent der Wasseraufnahme (auf der sicheren Seite liegend) nach 10 Minuten, angerechnet und bei Änderung der Feuchtebedingungen überprüft werden. Unter Verwendung eines auf rezyklierte Gesteinskörnung und den verwendeten Zement abgestimmten Fließmittels ist für die Konsistenz von Beton mit rezyklierte Gesteinskörnung gegenüber Normalbetonen jedoch keine Verschlechterung zu erwarten.

In zahlreichen Untersuchungen (z. B. von Hoffmann und Hurth [40], Kerckhoff und Siebel [30], sowie Müller [35]) deckt sich die Erfahrung, dass die Zugabe von verflüssigenden **Betonzusatzmitteln** unbedingt erforderlich ist, um eine ausreichende Verarbeitbarkeit ohne zu hohe Wasserzementwerte zu erreichen. Der Wasseranspruch der rezyklierten Gesteinskörnung ist tendenziell höher als bei primärer Gesteinskörnung. Wie auch für Normalbetone erforderlich, ist die Kompatibilität und Wechselwirkung zwischen Zement, Gesteinskörnung und den eventuell weiteren Zusatzmitteln bei der Auswahl zu berücksichtigen. Vom Regelwerk wird vorgegeben, dass im Rahmen der erweiterten Erstprüfung die notwendige Dosiermenge, auch für eine eventuell erforderliche Nachdosierung auf der Baustelle, zu ermitteln ist.

Da rezyklierte Gesteinskörnung nicht wie natürliche Gesteinskörnung aus einem weitgehend homogenen Vorkommen stammt sondern von den Eigenschaften des aufbereiteten Bauschutts abhängt, schwanken ihre Eigenschaften wie Wasseraufnahme, Rohddichte, Porosität und Wasseraufnahme. Die Schwankungen können durch eine Homogenisierung von aufbereitetem Material durch den Bauschuttaufbereiter minimiert werden, dennoch muss für die **Betonherstellung** die Gesteinskörnung auf ihre wesentlichen Eigenschaften geprüft werden.

Für die **Produktionskontrolle** des Betonherstellers ergeben sich aus den Regelwerken zusätzliche Anforderungen gegenüber der Verwendung natürlicher Gesteinskörnung, die der Streuung bei den Eigenschaften von rezyklierte Gesteinskörnung Rechnung tragen.

Es ist vom Betonhersteller eine Sichtprüfung der stofflichen Zusammensetzung der rezyklierten Gesteinskörnung in jedem Lieferfahrzeug durchzuführen, zudem ist in jeder Produktionswoche die Kornrohddichte (ofentrocken) nach DIN EN 1097-6, sowie die Wasseraufnahmen nach 10 Minuten nach Anhang B der DAfStb-Richtlinie zu ermitteln. Bei Änderung der Feuchtebedingungen ist der Wassergehalt der rezyklierten Gesteinskörnung zu bestimmen.

Die geringere Kornfestigkeit im Vergleich mit Primärgesteinen wirkt sich auf die **Betondruckfestigkeit** auch bei vollständigem Ersatz der groben Gesteinskörnung nicht aus, solange die Zusammensetzung der rezyklierten Gesteinskörnung die Regelwerkanforderungen erfüllt. Wird die Wasseraufnahme nicht korrekt abgeschätzt, kann es durch die ungewollte Veränderung des Wasserzementwertes indirekt zu einem Einfluss auf die Druckfestigkeit kommen. Eine Unterschätzung des Saugvermögens führt dazu, dass die Gesteinskörnung der Betonzusammensetzung unkontrolliert Wasser entzieht, das somit nicht für die Hydratation des Zementleims zur Verfügung steht und den Wasserzementwert ungewollt und unkontrollierbar absenkt. Die Festigkeitsergebnisse sind unter Umständen besser, da der verringerte Wasserzementwert zu einer höheren Festigkeit des Zementsteins führt. Umgekehrt führt eine Überschätzung des Saugvermögens dazu, dass nicht das komplette zusätzliche Wasser von der Gesteinskörnung als Kernfeuchte gebunden wird, wodurch mehr freies Wasser vorhanden ist als berechnet. Der Wasserzementwert wird erhöht, was zu geringeren Festigkeiten führt. In der Literatur [36, 37] wird festgestellt, dass die Gesteinskörnung im Frischbeton nicht das gleiche Saugvermögen hat wie im Pyknometerversuch, da der Zementleim einen Teil der offenen Poren verstopft und so zu geringerem Saugvermögen führt. Insgesamt ist nicht von einem negativen Einfluss von rezyklierter Gesteinskörnung Typ 1 oder Typ 2 auf die Betondruckfestigkeit auszugehen.

Auch die **Dauerhaftigkeit** der Betone ist nicht vermindert. Innerhalb der zulässigen Expositionsklassen gemäß der geltenden Regelwerke ist gewährleistet, dass die Betone vergleichbare Eigenschaften wie Normalbeton aufweisen. Zu beachten ist, dass bei der Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung die Frostbeständigkeit über die Prüfung am Beton nachgewiesen werden sollte. Zwischen den Ergebnissen der Frostprüfung an der Gesteinskörnung selbst und den Ergebnissen an daraus hergestellten Betonen besteht kein Zusammenhang. Reine Ziegelsplitte, die anhand der Frostprüfung an der Gesteinskörnung selbst für Betone mit hoher Frostbeanspruchung als geeignet einzustufen wären, zeigen im Betonversuch eine verringerte Frostbeständigkeit. Umgekehrt führen Prüfungen an Betonsplitten zu negativen Prüfergebnissen, die daraus hergestellten Betone weisen jedoch eine hohe Frost- und Frost-Tausalz-Beständigkeit auf.

Der **Elastizitätsmodul** von Beton ist in hohem Maße vom Elastizitätsmodul der Gesteinskörnung abhängig. Durch die höhere Porosität besitzen rezyklierte Gesteinskörnungen im Allgemeinen einen geringeren Elastizitätsmodul als natürliche Gesteinskörnungen. Der Elastizitätsmodul des Betons sinkt durch den Einsatz von Betonsplitt geringfügig ab,

mit zunehmendem Anteil an porösem Mauerwerksplitt sinkt er weiter, liegt aber immer noch innerhalb der Bandbreite, die bei Beton mit unterschiedlichen natürlichen Gesteinskörnungen gegeben ist.

Bedingt durch den geringeren Elastizitätsmodul der Gesteinskörnung sowie den am Betonsplitt anhaftenden Zementstein ist das **Schwinden** bei Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung stärker ausgeprägt als bei Betonen mit primärer Gesteinskörnung [35], da sie einen geringeren Verformungswiderstand besitzen. Gemäß [35] liegt jedoch auch für Betone mit 100 % Ersatz der Gesteinskörnung > 4 mm das Schwindmaß innerhalb des Bereichs für praxisübliche Normalbetone.

Auch **kriechen** die Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung stärker als Beton mit sonst identischer Zusammensetzung mit natürlicher Gesteinskörnung. Bei Einsatzmengen von bis zu 75 Vol.-% Betonsplitt > 2 mm bewegen sich laut [35] die Kriechdehnungen in der Regel im Wertebereich üblicher Betone mit natürlicher Gesteinskörnung.

Bei Anwendung der geltenden Regelwerke sind die Bemessungskonzepte für Normalbeton uneingeschränkt anwendbar. Hier ergeben sich keine erforderlichen Änderungen durch die Verwendung von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung, sodass auch nach Abschluss der Tragwerksplanung die Auswahl des Betons frei bleibt.

3.2.3 Liefersicherheit und mögliche Strategien

Dass rezyklierte Gesteinskörnung in der Betonherstellung nicht zum vollständigen, flächendeckenden Ersatz von Primärkörnung als Betonausgangsstoff dienen kann, macht die aktuell bereits hohe Verwertungsquote der 54,6 Mio. t Material in der Abfallfraktion Bauschutt von 77,8 % im Jahr 2014 [41] genau wie der Vergleich von anfallenden Mengen an mineralischem Bauabfall mit dem Gesteinskörnungsverbrauch der Betonindustrie deutlich. Auch in ihrem Positionspapier zu Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung [9] kommt der Bundesverband Transportbeton zu dem Schluss, dass rezyklierte Gesteinskörnung eine wichtige Alternative zur Sicherung der Flexibilität von Betonherstellern in Zukunft ist, jedoch keinesfalls dazu dienen kann in allen hergestellten Betonen primäre Gesteinskörnung zu ersetzen. Die hierfür notwendigen Mengen sind weder aktuell vorhanden noch zukünftig zu erwarten, wie in [42] ermittelt. Vielmehr ist es im Sinne der Ressourcenschonung und zukünftigen Rohstoffsicherung sinnvoll die technischen Grenzen in Forschungsergebnissen zu ermitteln, in der Praxis aber mit geringeren Anteilen in einer Vielzahl von Betonen, oder durch Einsatz der rezyklierten Gesteinskörnung entsprechend ihrer lokalen Verfügbarkeit in denjenigen Betonsorten, in denen keine technischen Herausforderungen zu erwarten sind, sinnvoll und hochwertig zu verwerten.

Funktionierende Konzepte hierzu existieren beispielsweise in Nachbarländern wie der Schweiz [43] oder den Niederlanden [44], wo ohne Deklarationspflicht und ohne technische Einschränkungen rezyklierte Gesteinskörnungen in Normalbeton bis zu 25 % bzw. 30 % der primären Gesteinskörnung ersetzen dürfen. Ähnliche Konzepte wären auch in Deutschland denkbar, die den Betonherstellern eine größtmögliche Flexibilität bei der Auswahl der lokal und zeitlich verfügbaren Rohstoffe lassen.

4 Ausblick

Wie in diesem Beitrag dargelegt, besitzen auch Gesteinskörnungen durchaus noch Potential, das mit Hilfe neuer Prüfmethode wie der Computertomographie aber auch der Etablierung neuer fundierter Anwendungsgrenzen in den bestehenden Regelwerken erschlossen werden kann.

Dabei erweist sich die Computertomographie als vielversprechendes Werkzeug für die geometrische Charakterisierung von Gesteinskörnungen vom Feinstsandbereich bis hin zu den groben Fraktionen. Auch für die Charakterisierung von rezyklierter Gesteinskörnung kann sich die Computertomographie als hilfreich erweisen. Um dieses Werkzeug bestmöglich einsetzen zu können, werden weiterhin Forschungsarbeiten erforderlich sein, um die Vorgehensweise zu verfeinern, die Bildbearbeitung zu vereinfachen und anschließend neue dreidimensionale Kennwerte zu entwickeln.

Die Gründe für die derzeit geringe Bedeutung von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung für die Praxis der Betonherstellung liegen in Deutschland darin begründet, dass die relevanten Normen und Bauvorschriften für Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung viele Einschränkungen enthalten, die der Praxis keine Anreize, stattdessen aber zahlreiche Hemmnisse bieten. Anreize oder Zwänge für die Praxis in Form von gesetzlichen Vorgaben oder positiven Bewertungen bei Zertifizierungssystemen existieren in Deutschland nicht. Zudem ist natürliche Gesteinskörnung in vielen Regionen in großem Umfang verfügbar und erfordert einen geringeren Prüf- und damit Kostenaufwand im Vergleich zu rezyklierter Gesteinskörnung. Der heutige Stand der Technik und das gestiegene wissenschaftliche Verständnis der mikroskopischen Funktionsmechanismen von Beton bieten völlig neue Möglichkeiten dieses Thema zu bearbeiten. Aus den geschilderten Regelwerkeinschränkungen ergeben sich in Deutschland zahlreiche Aufgabenstellungen für die Forschung. Daher ist es das Ziel des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Verbundforschungsprojekts „R-Beton – Ressourcenschonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation“ [45], Wege zu finden, die bestehenden Regelungshemmnisse nachhaltig zu beseitigen, um

zukünftig Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung in eine breite praktische Anwendung zu bekommen. Die bestehenden Hemmnisse wurden analysiert und werden im Rahmen des seit November 2014 laufenden Projekts in einzelnen Arbeitspaketen untersucht. Über die Projektziele und Projektinhalte, sowie erste Ergebnisse wurde bereits u. a. in [45, 27, 46] informiert.

5 Literatur

- [1] Stark, J., Wicht, B. (1998) Geschichte der Baustoffe. Vieweg+Teubner Verlag. Wiesbaden.
- [2] Fingerloos, F. (Hg.) (2009) Historische technische Regelwerke für den Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau. Bemessung und Ausführung. Ernst. Berlin.
- [3] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (1955) Bestimmungen des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, 6. ber. und erw. Aufl. Stand April 1955. Ernst. Berlin.
- [4] Franz, G. (Hg.) (1971) Beton Kalender 1971. Teil 2. Ernst. Berlin.
- [5] Müller, H.-S. (2007) Zum Baustoff der Zukunft. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hg.): Gebaute Visionen - 100 Jahre Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Beuth, Berlin, Wien, Zürich, S. 195-219.
- [6] Spengler, A. (2005) Technologie sandreicher Betone. Dissertation, Technische Universität München. München.
- [7] Bundesverband Mineralische Rohstoffe e.V. - MIRO (Hg.) (2014) Knappheiten an der falschen Stelle vermutet. Medienwirksames Erschrecken. Pressemitteilung.
- [8] Industrieverband Steine und Erden e.V. (Hg.) (2017) Jahresbericht 2016/2017.
- [9] Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (Hg.) (2017) Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung in der deutschen Transportbetonindustrie. Positionspapier.
- [10] König, G., et al. (2001) Hochleistungsbeton. Bemessung, Herstellung und Anwendung. Ernst. Berlin.
- [11] Fehling, E., Schmidt, M. (Hg.) (2005) Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung ultrahochfester Betone (UHPC). Forschungsbericht DFG FE 497/1-1. Kassel Univ. Press. Kassel.
- [12] Fernlund, J.M.R. (2005) Image analysis method for determining 3-D shape of coarse aggregate. Cement and Concrete Research 35, 8, S. 1629-1637.

- [13] Blott, S. J., Pye, K. (2007) Particle shape: A review and new methods of characterization and classification. *Sedimentology* 55, 1, S. 31-63.
- [14] Ostheeren, K., et al. (2011) Die Zukunft der Brechsande? Einfluss der Kornform von Sanden auf die Verarbeitungseigenschaften von SVB-Mörteln. *Aufbereitungstechnik* 52, 01-02, S. 52-59.
- [15] Ma, Z., et al. (2001) Extending laser diffraction for particle shape characterization. Technical aspects and application. *Powder Technology* 118, 1-2, S. 180-187.
- [16] Erdoğan, S. T., et al. (2007) Shape and size of microfine aggregates. X-ray microcomputed tomography vs. laser diffraction. *Powder Technology* 177, 2, S. 53-63.
- [17] Liao, C.-W., et al. (2010) On-line full scan inspection of particle size and shape using digital image processing. *Particuology* 8, 3, S. 286-292.
- [18] Garboczi, E. J., et al. (2006) Using LADAR to characterize the 3-D shape of aggregates. Preliminary results. *Cement and Concrete Research* 36, 6, S. 1072-1075.
- [19] Bagheri, G. H., et al. (2015) On the characterization of size and shape of irregular particles. *Powder Technology* 270, S. 141-153.
- [20] Garboczi, E. J., Bullard, J. W. (2017) 3D analytical mathematical models of random star-shape particles via a combination of X-ray computed microtomography and spherical harmonic analysis. *Advanced Powder Technology* 28, 2, S. 325-339.
- [21] Erdogan, S. T., et al. (2006) Three-dimensional shape analysis of coarse aggregates. New techniques for and preliminary results on several different coarse aggregates and reference rocks. *Cement and Concrete Research* 36, 9, S. 1619-1627.
- [22] Lin, C. L., Miller, J. D. (2005) 3D characterization and analysis of particle shape using X-ray microtomography (XMT). *Powder Technology* 154, 1, S. 61-69.
- [23] Wu, J., et al. (2017) A digital image analysis of gravel aggregate using CT scanning technique. *International Journal of Pavement Research and Technology*, S. x-xx.
- [24] Garboczi, E. J., et al. (2012) The 3-D shape of blasted and crushed rocks: From 20 μm to 38 mm. *Powder Technology* 229, S. 84-89.
- [25] Bund, B., Burgmann, S., Breit, W. (2016) 3D Kenndaten zur Charakterisierung von Gesteinskörnungen basierend auf CT-Aufnahmen. In: Tue, N. V., Krüger, M., Freytag, B. (Hg.): *Beton Graz '16*. Tagungsband zum 3. Grazer Betonkolloquium 29./30. September 2016, S. 231-238.
- [26] Dornisch-Bund, B., Breit, W. (2017) Entwicklung 3-dimensionaler Parameter zur Charakterisierung von Gesteinskörnungen auf Basis von CT-Aufnahmen. In: *Beiträge zur 5. DAfStb-Jahrestagung mit 58. Forschungskolloquium*, S. 206-215.
- [27] Scheidt, J., Breit, W. (2017) R-Beton: Neue Konzepte werden ihn etablieren. *beton* 67, Heft 9, S. 327-328.
- [28] Hoffmann, C., Jacobs, F. (2007) Recyclingbeton aus Beton- und Mischabbruchgranulat. Sachstandsbericht. <http://library.eawag-empa.ch/>
- [29] Müller, A., Stürmer, S. (2017) Aufbereitungstechnik - Status quo und Zukunft. *beton* 67, Heft 9, S. 317-321.
- [30] Kerkhoff, B., Siebel, E. (2002) Einfluss von rezykliertem Zuschlag aus Betonbruch auf die Eigenschaften, insbesondere die Dauerhaftigkeit von Beton. In: *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hg.): Heft 514*, Beuth, Berlin.
- [31] Wies, S., Manns, W. (2002) Frostwiderstand von rezykliertem Zuschlag aus Altbeton und mineralischen Baustoffgemischen (Bauschutt). In: *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hg.): Heft 514*, Beuth, Berlin.
- [32] Diedrich, R., et al. (August 2001) Rückenstützbetone mit Recyclingzuschlägen aus Bauschutt. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben AiF 11414 N. Bremen.
- [33] Müller, C., Dora, B. (Hg.) (2000) Verwertung von Brechsand aus Bauschutt. Beuth. Berlin.
- [34] Breit, W., Scheidt, J. (2018) Status Quo beim Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung in der Betonherstellung. *beton* 68, Heft 1
- [35] Müller, C. (Hg.) (2001) Beton als kreislaufgerechter Baustoff. Beuth. Berlin.
- [36] Quattrone, M., et al. (2016) Measuring the water absorption of recycled aggregates, what is the best practice for concrete production? *Construction and Building Materials* 123, Supplement C, S. 690-703.

[37] Klein, N. S., et al. (2014) Prediction of the water absorption by aggregates over time. Modelling through the use of value function and experimental validation. Construction and Building Materials 69, Supplement C, S. 213-220.

[38] InformationsZentrum Beton (2017) Zement-Merkblatt Betontechnik B20: Zusammensetzung von Normalbeton - Mischungsberechnung.

[39] Poon, C. S., et al. (2004) Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. Cement and Concrete Research 34, 1, S. 31-36.

[40] Hoffmann, C., Hurth, O. (2006) Konstruktionsbeton aus recycelter Gesteinskörnung. (Beton- und Mischabbruchgranulat). <http://library.eawag-empa.ch/>

[41] Bündnis Kreislaufwirtschaft Bau (2017) Mineralische Bauabfälle Monitoring 2014. Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2014.

[42] Bundesverband Baustoffe- Steine und Erden e. V. (Hg) (2016) Studie „Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland“.

[43] Strauss, M. (2017) R-Beton - Die Schweiz zeigt, wie es geht. beton 67, Heft 9, S. 339-340.

[44] Dekker, L. (2017) Einsatz von mineralischen Bauabfällen in den Niederlanden. beton 67, Heft 9, S. 340-342.

[45] HeidelbergCement AG (Hg.) R-Beton - Ressourcenschonender Beton - Werkstoff der nächsten Generation [Homepage]. <http://www.r-beton.de>.

[46] Breit, W., Scheidt, J., Boeing, R. (2017) BMBF HighTechMatBau Vorhaben "R-Beton" - erste Ergebnisse und erste praktische Umsetzung im Großdemonstrator. Newsletter Technik Heidelberg Cement, 12/2017, S. 2-13.

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit

Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen
TU Kaiserslautern
Gottlieb-Daimler-Str. Geb. 60
67663 Kaiserslautern

Dipl.-Ing. Julia Scheidt

Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen
TU Kaiserslautern
Gottlieb-Daimler-Str. Geb. 60
67663 Kaiserslautern

Dipl.-Ing. Bianca Dornisch-Bund

Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen
TU Kaiserslautern
Gottlieb-Daimler-Str. Geb. 60
67663 Kaiserslautern

Robert Adams

Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen
TU Kaiserslautern
Gottlieb-Daimler-Str. Geb. 60
67663 Kaiserslautern

Bemessungsrelevante Kennwerte zukünftiger Betone und deren Abbildung in Regelwerken

Frank Dehn

Zusammenfassung

Nicht zuletzt infolge eines gesellschaftlich und politisch motivierten Umdenkens unterliegt der Betonbau gegenwärtig einem von Nachhaltigkeit und effizienterem Ressourceneinsatz geleiteten Wandel, infolgedessen die Verwendung alternativer Ausgangsstoffe und -kombinationen zusehends an Bedeutung gewinnt, jedoch die klassischen betontechnologischen, auf deskriptiven Vorgaben basierenden Grundsätze an ihre Grenzen stoßen. Es ist daher nur konsequent, dass für die Anwendung zukünftiger Betone neue Ansätze entwickelt werden, die bewusst die für einen spezifischen Anwendungsfall benötigten und die darauf abgestellten Leistungsmerkmale der Betone in den Vordergrund stellen. Die Herausforderung bei einem solchen leistungsbezogenen Konzept (*performance-based concept*) besteht zum einen in der Kopplung der in der Praxis vorherrschenden komplexen Einwirkungsszenarien mit der Vielzahl an bereits heute, vor allem aber zukünftig zur Verfügung stehenden stofflichen Varianten, zum anderen aber insbesondere in den bislang nur bedingt vorhandenen Prüfverfahren, die eine statistisch abgesicherte Prognose des Betonverhaltens ermöglichen sollen. Dies trifft vorrangig für die Dauerhaftigkeitseigenschaften, aber auch auf die bemessungsrelevanten Kennwerte zukünftiger Betone zu. Der nachfolgende Beitrag gibt einen Überblick zum Stand der Umsetzung leistungsbezogener Bewertungskonzepte für bemessungsrelevante - vorwiegend mechanische - Kennwerte in pränormativen Regelwerken und Normen des Betonbaus sowie einen Vorschlag für zukünftige, gegenwärtig nicht den einschlägigen Normen genügende Betone.

1 Einleitung

Neuere Entwicklungen im Bereich der alternativen Bindemittel, Betonzusatzstoffe und -mittel fördern zwar den zunehmenden Einsatz moderner Betone in der Praxis, jedoch werden diese zumindest aktuell nur eingeschränkt von den gültigen Normen erfasst, geschweige denn geregelt. Vielmehr werden diese oftmals einzelfallbezogen bzw. projektspezifisch entwickelt, bewertet und dann deren Einsatz genehmigt.

Die üblichen mit den Expositionsclassen einhergehenden deskriptiven Vorgaben für die Betonausgangsstoffe, die Mindestdruckfestigkeitsklassen, die höchstzulässigen Wasserzement-Werte oder die Mindestzementgehalte sind auf solche modernen Betone oftmals nicht anwendbar. Der deskriptive Ansatz der Betonkonzeption geht dabei (teils fälschlicherweise) von der Annahme aus, dass Betone nahezu gleicher Zusammensetzung eine annähernd vergleichbare Leistungsfähigkeit aufweisen; sowohl bzgl. der bemessungsrelevanten (mechanischen) Kennwerte, als auch hinsichtlich der erzielbaren Dauerhaftigkeitseigenschaften.

Jedoch kann mit diesem Ansatz der kombinierte Einfluss der Betonausgangstoffwahl, der Bauweise und der vorherrschenden Umgebungsbedingungen nicht angemessen berücksichtigt werden.

Dagegen stützen sich leistungsbezogene Spezifikationen (*performance-based specifications*) auf bestimmte Leistungsmerkmale bzw. -kriterien ab, die spezifisch für bestimmte Anwendungsfälle definiert werden. Demnach werden bei leistungsbezogenen Ansätzen vielmehr zu erreichende Frisch- und Festbetoneigenschaften festgelegt und weniger eine bestimmte Betonzusammensetzung vorausgesetzt. Somit schließen leistungsbezogene Spezifikationen üblicherweise das Abprüfen betreffender Betoneigenschaften sowie die Beurteilung der Prüfergebnisse anhand von vereinbarten Konformitätsanforderungen explizit mit ein.

Aufgrund der Fortschritte bei der Entwicklung von kombinierte Einwirkungen berücksichtigende methodische Prüfkonzepte und -verfahren wird die leistungsbezogene „Bemessung“ des Betons und der Betonbauwerke ermöglicht und verstärkt in der Praxis angewendet.

Dieser Ansatz bedingt ein Umdenken gegenüber der bislang etablierten Nachweisführung, bei der die Betonzusammensetzung im Vordergrund steht. Die Chancen und Risiken der leistungsbezogenen Spezifikationen gegenüber dem deskriptiven Vorgehen gilt es abzuwägen.

Der meist verbreitete leistungsbezogene Bemessungsrelevante Kennwert ist die Betondruckfestigkeit f_c , auf die wiederum andere, teils empirische (z.B. f_{ct} , E_c usw.), teils physikalisch korrekte Bemessungskennwerte zurückgeführt werden. Jedoch ist für eine Reihe von Fällen, die ausschließliche Berücksichtigung von f_c als „Leistungsindikator“ für einen bestimmten Beton oder für eine Reihe in der Zusammensetzung vergleichbarer Betone nicht ausreichend, zumal die Beziehung zwischen der Betondruckfestigkeit und anderen Betoneigenschaften je nach Zusammensetzung stark schwankt.

Neben der Betondruckfestigkeit sind auch andere bemessungsrelevante Eigenschaften von großer Bedeutung für die Praxis, so dass auch diese gerade bei zukünftigen, dem Anwendungsfall anpassbaren Betonen (*tailormade concretes*) eingehend betrachtet werden müssen. Als Beispiele seien hier insbesondere das elastische und plastische (Langzeit-)Verformungsverhalten, die Frischbetoneigenschaften im Allgemeinen, die thermischen Eigenschaften während und nach der Erhärtung, die zeitliche Festigkeitsentwicklung, die Duktilität, der Widerstand gegen Rissbildung im jungen Beton usw. genannt.

2 Betonleistungsfähigkeit

2.1 Definition

In diesem Abschnitt wird versucht, eine allgemeingültige Definition für die Betonleistungsfähigkeit (*performance-based specifications*) herzuleiten, die sowohl für die Dauerhaftigkeitsbetrachtung als auch bei anderen relevanten Betonkennwerten angewendet werden kann, wie sie bspw. mit der Tragwerksbemessung in Zusammenhang stehen. Es wird vorgeschlagen, dass sich „... leistungsbezogene Betonspezifikationen auf die zuvor verbindlich festgelegten Betoneigenschaften und/oder die Eigenschaften des Betonbauwerks selbst abstützen, welche sich auf die benötigte Leistungsfähigkeit des einzelnen Betons und/oder Betonbauwerks beziehen und die eine Bewertung besonderer Eigenschaften mittels einer validierten Prüfung und/oder einer konstitutiven Modellierung einschließt. Der Ansatz der leistungsbezogenen Betonspezifikationen weicht insofern von den klassischen deskriptiven Vorgaben in den Normen ab, da diese die erzielbaren Eigenschaften des Betons mit dessen auf Erfahrung gründende Zusammensetzung verbinden“.

Mit dieser allgemeingültigen Formulierung soll deutlich werden, dass für zukünftige Betone, für die nur bedingt ausreichende Langzeiterfahrungen vorliegen können, eine Möglichkeit der Anwendung geschaffen werden kann, ohne dabei die hohen

Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen in Frage zu stellen, wie man sie für genormte „Standardbetone“ erwartet.

2.2 Regelwerke mit leistungsbezogener Grundlage

In jüngerer Zeit wurden leistungsbezogene Bemessungsansätze ohne oder in Kombination mit geeigneten Prüfverfahren in erster Linie zur Bewertung der Betondauerhaftigkeit für die Expositionsclassen XC, XD und XS entwickelt (z.B. über sog. Widerstandsklassen (RC) zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit in EN 206, abgeleitet aus der Lebensdauerbemessung nach ISO 16204 oder in [1]) und bspw. in der Schweiz (gemäß SN EN 206 in Verbindung mit SIA 262) oder in Südafrika (über einen sog. Durability Index Approach (DIA)) [2] (vgl. RILEM TC 230-PSC (2016)) verbindlich in das jeweilige nationale Regelwerk implementiert. Bei diesen Regelungen handelt es sich meistens jedoch um die Erweiterung der üblichen deskriptiven Ansätze durch einen zusätzlichen leistungsbezogenen Bewertungszusatz. Regelwerke, die ausschließlich leistungsbezogene Betonspezifikationen berücksichtigen, sind vorrangig in Nordamerika (ACI in den USA und CSA in Kanada) eingeführt worden. Diese wären bspw.:

- American Concrete Institute (ACI) 329R-14 Report on performance-based requirements for concrete, 2015, ISBN 978-08-703-1974-7
- Canadian Standard Association (CSA) A23.1-09 und A23.2-09 Concrete materials and methods and concrete construction / methods of test and standard practices for concrete, 2014

Man muss jedoch einschränkend festhalten, dass die leistungsbezogene Betrachtung der Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen weitaus komplexer ist, als bspw. jene für die Frischbetoneigenschaften bzw. die für die bemessungsrelevanten Kennwerte, die mit der Tragwerksbemessung im Zusammenhang stehen.

Insbesondere die Bewertung der leistungsbezogenen Dauerhaftigkeitseigenschaften steht und fällt mit der Bereitstellung allgemeingültiger, anerkannter und statisch abgesicherter, verifizierender Prüfverfahren und Modelle, mit denen experimentell und/oder numerisch nachgewiesen werden kann, dass der für den spezifischen Anwendungsfall erwartete Betonwiderstand erreicht wird [3, 4].

Wie bzgl. bemessungsrelevanter Kennwerte zukünftiger Betone und deren Abbildung in Regelwerken perspektivisch verfahren werden könnte, soll im folgenden Abschnitt 3 detaillierter beschrieben werden.

3 Wesentliche bemessungsrelevante Kennwerte zukünftiger Betone

Im Hinblick auf eine Einordnung und Vergleichbarkeit der Eigenschaften zukünftiger Betone gegenüber den normierten „Standardbetonen“ sollten wesentliche Referenzparameter (RP) ermittelt bzw. experimentell abgeprüft werden. Hierbei muss darauf geachtet werden, inwieweit die gängigen Prüfverfahren überhaupt auf die zukünftigen Betone angewendet werden können, um die charakteristischen, bemessungsrelevanten Eigenschaften verifizieren zu können, weichen diese doch ggf. hinsichtlich der zeit- und/oder temperaturabhängigen Reaktionskinetik alternativer Bindemittel im Wechselspiel mit Betonzusatzstoffen, -mitteln und Gesteinskörnungen deutlich von den einschlägig geregelten Standardbetonen ab [4]. Hinsichtlich der oben erwähnten Referenzparameter kann in diesem Zusammenhang bspw. auf DIN EN 1992-1-1 [5] oder auf das Kapitel 5.1 des *fib* Model Code 2010 [6] zurückgegriffen werden, in dem die zur Beschreibung eines Betons maßgebenden bemessungsrelevanten Kennwerte aufgeführt sind (Tabelle 1).

Tab. 1: Überblick maßgebender, bemessungsrelevanter Kennwerte zukünftiger Betone

Referenzparameter (RP)	Bemessungsrelevante Kennwerte
Mechanisches Verhalten	Dichte, Druckfestigkeit, Zugfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, Biegezugfestigkeit, Bruchenergie, E-Modul, Querdehnzahl
Last-Verformungsverhalten (Kurzzeit)	Druck, Zug
Zeitabhängiges Verhalten (Kurzzeit, Langzeit)	Druckfestigkeit, Zugfestigkeit, E-Modul, Kriechen, Schwinden
Temperaturabhängiges Verhalten (Kurzzeit, Langzeit)	Last-Verformung, Temperaturendeckung, Druckfestigkeit, Zugfestigkeit, Bruchverhalten, E-Modul, Kriechen (einschließlich transientes Kriechen), Relaxation, Schwinden, Hoch- und Tieftemperaturverhalten, Zwang
Nicht-statisches Verhalten	Ermüdung (Festigkeit, Verformung), Effekte aus Spannungs- und Verformungsraten (Anprall, Explosion)

4 Mögliche Berücksichtigung leistungsbezogener Spezifikationen für zukünftige Betone

Die Berücksichtigung leistungsbezogener Spezifikation für bemessungsrelevante Kennwerte zukünftiger Betone setzt zunächst eine gewisse Systematik voraus, wie bspw. anhand geeigneter Prüfungen die gewonnenen Ergebnisse bewertet und in ein entsprechendes neues Materialmodell implementiert werden können. Gegebenenfalls sind aber auch Anpassungen oder Korrekturen an bereits vorhandenen Materialmodellen oder Prüfverfahren sinnvoll, die die charakteristischen Eigenschaften der zukünftigen Betone widerspiegeln, vorausgesetzt, dass die Materialmodelle und Prüfverfahren überhaupt geeignet sind, das spezifische Verhalten der zukünftigen Betone ausreichend abzubilden. In diesem Zusammenhang sind daher die folgenden Fragen zu stellen: 1. *Gibt es überhaupt ein geeignetes Prüfverfahren?* 2. *Kann man einen spezifischen Materialkennwert eines zukünftigen Betons anhand des geeigneten Prüfverfahrens bestimmen und bewerten?* und 3. *Kann man auf ein bereits anerkanntes Materialmodell zurückgreifen?* [4].

Dies könnte z.B. in einem ersten Schritt anhand von vordefinierten Klassen für die wesentlichsten Betonausgangsstoffe Gesteinskörnung (Abschnitt 4.1) und Bindemittel (Abschnitt 4.2) erfolgen, die dann zukünftig durch weitere gewonnene Daten verfeinert werden können, vorausgesetzt, es ist ein belastbarer Umfang an reproduzierten Daten bereits vorhanden. Da insbesondere die mechanischen, bemessungsrelevanten Eigenschaften von aus alternativen Bindemitteln hergestellten Betonen teils starken Streuungen unterliegen, ist zu vermuten, dass ggf. erforderliche Korrekturfaktoren zunächst konservativ anzusetzen sind.

Mittels der chemischen Zusammensetzung - insbesondere bzgl. der CaO -, SiO_2 - und Al_2O_3 -Gehalte - erscheint es jedoch möglich zu sein, die unterschiedlichen Betonkomponenten vergleichend miteinander zu korrelieren. Nachfolgend wird hierzu eine mögliche Verfahrensweise vorgeschlagen.

4.1 Klassifizierung der Gesteinskörnung

Die folgende Abbildung 1 zeigt eine auf Basis einer Literatursichtung ermittelte exemplarische Zusammenstellung der chemischen Zusammensetzung unterschiedlicher Gesteinskörnungen. Naturgemäß unterliegt die chemische Zusammensetzung natürlicher Gesteine einer großen Varianz, jedoch können diese in zwei maßgebliche Gruppen (Gesteinskörnungsklassen, GK-Klasse) eingeteilt werden:

- *Silikatische* Gesteinskörnungen (GK-Klasse I)
- *Karbonatische* Gesteinskörnungen (GK-Klasse II)

Hinsichtlich zukünftiger Gesteinskörnungen, die durch deren chemische Zusammensetzung nicht in die oben aufgeführten GK-Klassen I und II eingeteilt werden können, ist die Einführung zusätzlicher Klassen möglich.

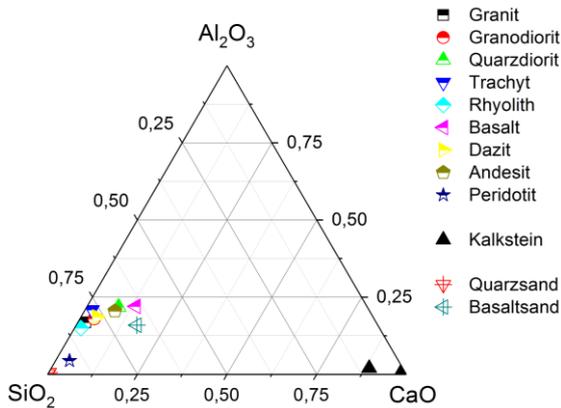


Abb. 1: Ternäres Phasendiagramm der chemischen Zusammensetzung verschiedener Gesteinskörnungen

Eine deutliche Anhäufung von entsprechenden Daten kann im silikatreichen Bereich des obigen ternären Phasendiagramms ausgemacht werden, was eine eindeutige Unterscheidung zwischen einzelnen Gesteinskörnungsarten schwierig macht. Eine zusätzliche Differenzierung kann bspw. über ein sog. TAS-Diagramm (Total-Alkali-Silika-Diagramm) erreicht werden (Abb. 2). Das TAS-Diagramm basiert auf der Unterscheidung des Alkaligehalts (Na_2O und K_2O) und des SiO_2 -Gehalts und ermöglicht eine zusätzliche Unterscheidung von Gesteinskörnungen in eine sog. alkalische und subalkalische Kategorie (Abb. 2).

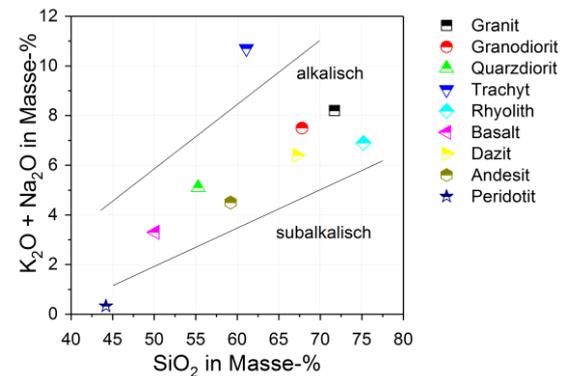


Abb. 2: Beispielhafte Darstellung der chemischen Zusammensetzung von Gesteinskörnungen mittels eines TAS-Diagramms

Eine solche Einteilung ist auch hinsichtlich der Bewertung des Verhaltens einer Gesteinskörnung in einer hochalkalischen Umgebung, z.B. in der Porenlösung zementärer oder alternativer Bindemittel (SCM, alkalisch-aktivierte Bindemittel oder Geopolymere) hilfreich [7] und sollte gerade im Hinblick auf die bemessungsrelevanten Kennwerte zukünftiger Betone beachtet werden.

4.2 Klassifizierung der Bindemittel

Für die Bindemittelklassifizierung kann die nachfolgende Abbildung 3 herangezogen werden [8]. Sie zeigt die chemische Zusammensetzung für eine Reihe von Zementen (CEM I bis CEM IV nach DIN EN 197-1), Zementersatzstoffen (SCM - Supplementary Cementitious Materials) und sonstige alternative Bindemittel. Zusätzlich sind zur Orientierung die inerten Gesteinsmehle aus Quarz und Kalkstein aufgeführt.

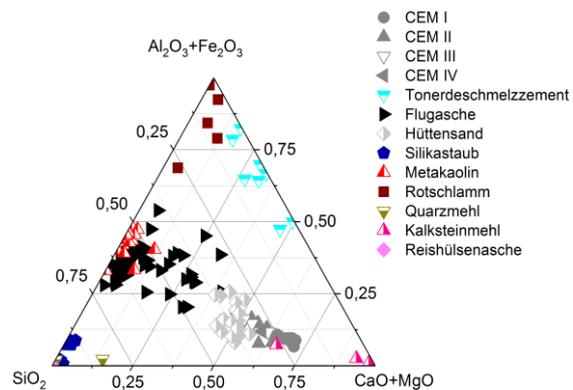


Abb. 3: Chemische Zusammensetzung verschiedener Bindemittel nach [8]

Vergleichbar wie bei der Herangehensweise für die Gesteinskörnung können auch für die unterschiedlichen Bindemittel entsprechende Klassen (Bindemittelklassen - BM-Klassen) definiert werden (Abb. 4).

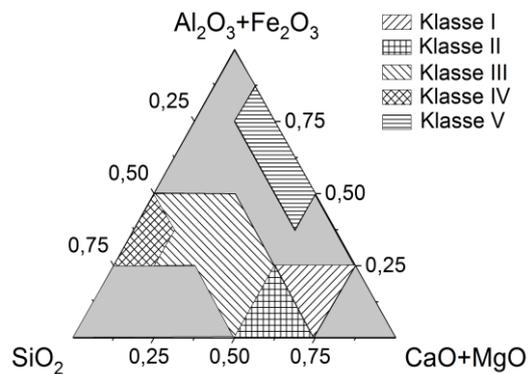


Abb. 4: Mögliche Klasseneinteilung für Bindemittel anhand der chemischen Zusammensetzung

Anhand der oben vorgeschlagenen Klasseneinteilung ergeben sich die folgenden BM-Klassen:

- *Portlandzemente* (BM-Klasse I)
- *Zementersatzstoffe* (SCM) (BM-Klasse II)
- *Ca-reiche Bindemittel* (z.B. alkalisch-aktivierte Bindemittel, AAB) (BM-Klasse III)
- *Ca-arme Bindemittel* (z.B. Geopolymere, GP) (BM-Klasse IV)
- *Al-reiche Bindemittel* (z.B. Tonerdeschmelzzemente) (BM-Klasse V)

In Tabelle 2 wird eine weitere Unterteilung der Bindemittel aufgrund der chemischen Zusammensetzung vorgenommen. Insgesamt kann die BM-Klasseneinteilung durch weitere zukünftige Bindemittel erweitert werden.

Tab. 2: Klassifizierung der Bindemittel bzgl. der chemischen Zusammensetzung (M.-%)

	BM-Klassen				
	I	II	III	IV	V
CaO + MgO	58,9 bis 75,4	47,4 bis 67,4	0,1 bis 55,5	0,1 bis 27,3	16,5 bis 49,4
Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	4,1 bis 13,0	7,8 bis 19,3	7,8 bis 53,9	23,5 bis 48,5	47,4 bis 82,4
SiO ₂	18,7 bis 27,9	23,7 bis 34,1	26,4 bis 66,7	36,8 bis 66,7	0,3 bis 7,9

Um insbesondere neue, alternative Bindemittel trotz der teils nicht vorhandenen Langzeiterfahrungen eine schnellere Anwendung in der Praxis zu ermöglichen, werden oft auf Basis eines sog. *semi*-leistungsbezogenen Nachweises auf internationaler Ebene Festlegungen getroffen. Hierbei steht vor allem die Vergleichbarkeit mit Bindemitteln und Betonen klassischer, deskriptiver Zusammensetzung im Vordergrund [9, 10, 11, 12, 13].

4.3 Kopplung der GK- und BM-Klassen mit Prüfverfahren und Materialmodellen

Mittels der in den Abschnitten 4.1 und 4.2 vorgestellten Klassifizierungen für Gesteinskörnungen und Bindemittel wird die Möglichkeit geschaffen, die bemessungsrelevanten Kennwerte zukünftiger Betone als Funktion der Zeit und Temperatur auf Basis von bereits existierenden Prüfverfahren und Materialmodellen grundsätzlich einzuordnen. Im Idealfall sind die Prüfverfahren und Materialmodelle auf die zukünftigen Betone übertragbar, so dass keine gesonderte Anpassung der Regelwerke erforderlich ist, sondern diese nur um eine bestimmte Gruppe zukünftiger Betone - entsprechend der stofflichen Zusammensetzung bspw. auf der Grundlage der vorgestellten GK- und BM-Klassen - ergänzt werden müssen (vgl. Tabelle 3a).

Zeigen jedoch an zukünftigen Betonen experimentell ermittelte Eigenschaften oder im Umgang mit dem Prüfverfahren Auffälligkeiten bzw. deutliche Abweichungen, so sind gesonderte Überlegungen anzustellen, bis hin zum Verwerfen des Prüfverfahrens bzw. der Entwicklung eines eigenen Materialmodells (vgl. Tabelle 3b).

Generell wird für zukünftige Betone erwartet, dass bzgl. der bemessungsrelevanten Kennwerte eher von sog. „Betonsystemen“ gesprochen werden muss, für die spezifische und nur bedingt verallgemeinerbare Materialmodelle abgeleitet werden können und sich somit deutlich von den normativ festgelegten Bemessungsansätzen, wie sie bspw. für Normal-, Leicht- und hochfesten Beton vorhanden sind, unterscheiden werden. Folgende zwei Beispiele sollen dies verdeutlichen.

Tab. 3a: Beispiel für die Kopplung der BM- und GK-Klassen anhand des Referenzparameters der mittleren Druckfestigkeit f_{cm}

RP	BM I	BM II	BM III	BM IV	BM V	GK I
f_{cm}	+	+	+	•	+	Q

mit: + Druckfestigkeitsklasseneinteilung nach DIN EN 206-1 und Prüfung nach DIN EN 12390-3 ist anwendbar für Betone unter Verwendung von Bindemitteln der Klassen BM I, II, III und V sowie einer Gesteinskörnung der Klasse GK I (Quarz).

- Druckfestigkeitsklasseneinteilung nach DIN EN 206-1 ist grundsätzlich anwendbar, jedoch Prüfung nach DIN EN 12390-3 ist nur bedingt anwendbar (Wasserlagerung ist zu vermeiden, bei Trockenlagerung ist ein Austrocknen der Prüfkörper zu vermeiden) für Betone unter Verwendung eines Bindemittels der Klasse BM IV sowie einer Gesteinskörnung der Klasse GK I (Quarz).

Tab. 3b: Beispiel für die Kopplung der BM- und GK-Klassen anhand des Referenzparameters der zeitlichen Entwicklung der mittleren Druckfestigkeit $f_{cm}(t)$

RP	BM I	BM II	BM III	BM IV	BM V	GK I
$f_{cm}(t)$	+	•	-	-	•	Q

mit: + Beiwert $\beta_{cc}(t)$ nach DIN EN 1992-1-1, Gleichung 3.1, ist anwendbar für Betone unter Verwendung eines Bindemittels der Klasse BM I sowie einer Gesteinskörnung der Klasse GK I (Quarz).

- Beiwert $\beta_{cc}(t)$ nach DIN EN 1992-1-1, Gleichung 3.1, ist grundsätzlich anwendbar für Betone unter Verwendung von Bindemitteln der Klassen BM II und V und einer Gesteinskörnung der Klasse GK I (Quarz). Eine Abschätzung der zeitlichen Entwicklung der Druckfestigkeit ist grundsätzlich möglich.

- Beiwert $\beta_{cc}(t)$ nach DIN EN 1992-1-1, Gleichung 3.1, ist nicht anwendbar für Betone unter Verwendung von Bindemitteln der Klassen BM III und IV sowie einer Gesteinskörnung der Klasse GKI (Quarz). Der Beiwert $\beta_{cc}(t)$ zur Berücksichtigung der Zementart, Lagerungstemperatur und -bedingungen überschätzt die zeitliche Druckfestigkeitsentwicklung in Abhängigkeit des Ca-Gehalts des Bindemittels teils deutlich und sollte gesondert experimentell ermittelt werden. Ein modifiziertes Materialmodell ist zu entwickeln.

Eine solche Kopplung ist letztendlich für alle in Tabelle 1 aufgeführten Referenzparameter (RP) bzw. alle bemessungsrelevanten Kennwerte möglich, setzt jedoch voraus, dass bestätigt werden konnte, dass das zugrundeliegende, jeweilige Prüfverfahren für die Kombination aus Bindemittel- und Gesteinskörnungsklasse und somit für die Verifizierung der charakteristischen Eigenschaften zukünftiger Betone grundsätzlich geeignet ist.

5 Zusammenfassung

Wie der Betonbau sich insgesamt stark im Umbruch befindet, so unterliegen auch die hierfür gültigen Regelwerke und Normen einem ständigen Anpassungs- und Fortschreibungsprozess. Im Rahmen dieses Beitrags sollte gezeigt werden, wie sich momentan für nichtgeregelte, aber für die Praxis bereits schon heute hochinteressante, zukünftige Betone insbesondere die bemessungsrelevanten Kennwerte ggf. bewertet und somit bedarfsgerecht anhand eines leistungsbezogenen Nachweiskonzepts angewendet werden könnten.

Mit den angeführten *Performance*-Ansätzen werden die Ziele verfolgt, Anregungen für alternative Bewertungs- und Bemessungskonzepte für zukünftige Betone zu geben sowie *einen* möglichen Weg aufzuzeigen, wie die Implementierung bislang nicht-geregelter Betone in die Normen ermöglicht werden könnte. Letztlich soll der Beitrag auch zur Erhöhung der Akzeptanz für neue, innovative betontechnologische Entwicklungen beitragen.

6 Literatur

- [1] DIN CEN/TR 16563:2014-04 bzw. DIN SPEC 18097:2014-04 Verfahrensgrundsätze zum Nachweis gleichwertiger Dauerhaftigkeit
- [2] Beushausen, H.-D., Fernandez Luco, L. (2016) Performance-based specifications and control of concrete durability, State-of-the-Art Report RILEM TC 230-PSC, Springer-Verlag, ISBN 978-9-401-77309-6

[3] Müller, C., Wiens, U. (2016) Betonbau im Wandel - Umsetzung von Performance-Konzepten, beton (1+2), Seite 10 - 17, Verlag Bau + Technik GmbH, Erkrath

[4] Dehn, F.; Herrmann, A. (2016) A performance-based approach for mechanical concrete properties - a roadmap towards constitutive coherences. In: Proceedings Beushausen, H.-D. (Ed.) "*fib* Symposium 2016: Performance-based approaches for Concrete structures - Cape Town / South Africa", pp. 83 - 90, ISBN 978-2-88394-120-5

[5] DIN EN 1992-1-1:2011-01 Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetongtragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau

[6] *fib* Model Code for Concrete Structures 2010, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, ISBN: 978-3-433-03061-5

[7] Herrmann, A.; König, A.; Dehn, F. (2017) Structural concrete based on alkali-activated binders: Terminology, reaction mechanisms, mix designs and performance. In: Structural Concrete - *fib* Journal. DOI: 10.1002/suco.201700016

[8] Herrmann, A.; König, A.; Dehn, F. (2015) Proposal for the classification of alkali-activated binders and Geopolymer binders. In: Cement International, Vol. 13, Issue 3, pp. 62-69, Verlag Bau+Technik GmbH, Erkrath

[9] Ukraine Standard DSTU B V 2.7-181:2009: Cements, alkaline

[10] CSA-A3000-13: Cementitious materials compendium

[11] ASTM C 1157 M:2011: Standard performance specification for hydraulic cement

[12] ACI TG-10, 2016-10: Guide for alternative cementitious materials (ACM)

[13] CEN/TR 16912:2016-05: Guidelines for a procedure to support the European standardization of cements

Autor

Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Gotthard-Franz-Str. 3
76131 Karlsruhe

Anforderungen an das Bauen der Zukunft aus Sicht eines Generalunternehmers – oder: Die Gestaltung der Bebauten (Um)Welt

Norbert Pralle und Franz-Josef Klager

Zusammenfassung

Die Bauwirtschaft ist volkswirtschaftlich von enormer Bedeutung, besonders wenn die Immobilien- und Zulieferwirtschaft eingerechnet wird. Sie prägt unsere gesamte Umwelt, d.h. auch Fauna und Flora und damit die Lebensgrundlage für uns Menschen. Der für das Bauen aufgewendete Ressourcenverbrauch nimmt weltweit inzwischen bedenkliche Ausmaße an. Ein weiteres Merkmal der Bauwirtschaft ist ihre industrielle Ineffizienz, verglichen mit der Produktivität stationärer Industrien. Auch wenn der Bausektor als innovationsträge gilt, kann er sich dem Sog der technologischen Entwicklungen nicht entziehen. Zahlreiche internationale Studien sehen in den digitalbasierten Informations- und Kommunikationstechnologien den Schlüssel zu einem effizienteren, hochwertigeren und wirtschaftlicheren Bauen. Zentrales Merkmal dabei sind die Möglichkeiten, die meisten Vorgänge zu messen, den Bauteilen und -stoffen Informationen zuzuschreiben, die zu gegebener Zeit, bei Einbau auf einer Baustelle, beim Rück- oder Umbau nach der Nutzungsphase ausgewertet werden können. Hierbei kommt der Planungsphase eine größere Bedeutung als bisher zu: Im Front-loaded Design sind die Optionen der späteren Nutzung vorwegzunehmen. Dabei sehen wir eine zunehmende Integration von Funktionalität bei Materialien, Bauteilen, Gebäuden. Bauen wird zunehmend systemisch im Lebenszyklus gedacht werden müssen; nicht nur bei Bauobjekten, sondern von Stadtvierteln. Altbauten werden von Neubauten energetisch versorgt werden, während sie mit ihrer Geschichte das Leben in den Städten prägen. Entsprechend verändern sich die Aufgaben von Planern, Bauingenieuren, auch der Bürger. Die Aufgaben, die sich aus dem augenscheinlich unausweichlichen Trend des Systemischen ergeben, lassen sich nur durch neue Formen der Zusammenarbeit stemmen. Daher lautet die Zukunft des Bauens: Partnerschaft.

1 Anteile und Anwendungsbereiche bewährter Zemente

Mühe los überqueren wir in der heutigen Zeit tiefe Täler, gleiten durch Berge, fahren selbstverständlich entlang vielspurigen Autobahnen, die sich in Stapeln kreuzen, werden durch riesige Gebäudekomplexe hindurch bewegt ohne die Witterung wahrzunehmen, schweben in Kabinen in große Höhen, schauen aus gläsernen Wänden auf Millionenstädte hinab. Immer mehr Menschen arbeiten und wohnen in Gebäuden von hunderten Metern Höhe, wechseln mit enormer Geschwindigkeit ihre Standorte über Länder und Kontinente hinweg. Auch wirtschaftlich ist der Bausektor von zentraler Bedeutung: So sind allein 10% des Bruttoinlandsproduktes der Europäischen Union ausschließlich Bauinvestitionen zuzurechnen, weltweit sind es etwa 13%. Der Bausektor schafft grundlegende Infrastrukturen zum Wohnen und Arbeiten, worauf andere Wirtschaftszweige angewiesen sind, um ihre Kraft entfalten können.

Diese Welt wurde über große Zeiträume hinweg erbaut – und wird täglich erweitert und erneuert. Nun steht der Bausektor vor großen Aufgaben: Die zunehmende Migration, ein allortens wachsender Anteil der „Silver Generation“ an der Gesamtbevölkerung mit entsprechenden Bedürfnissen an das Wohnen und Leben sowie die Landflucht erhöhen den Bedarf an bezahlbarem Wohnraum in den Metropolen auf allen Kontinenten. Neue Straßen und Metrolinien sind zu bauen und in die Jahre gekommene Infrastrukturnetze in Europa und Nordamerika wollen modernisiert sein – das sind nur wenige Beispiele, weshalb gesteigerte Investitionen in den Bausektor in den nächsten Jahren erwartet werden [1].

So erfreulich diese Aussicht aus rein ökonomischer Perspektive scheinen mag, Vor den Auswirkungen auf die Umwelt und damit den langfristigen Auswirkungen auf die Lebensgrundlage des Menschen dürfen wir den Blick nicht verschließen. Die Bauwirtschaft ist der größte Verbraucher von

stofflichen Ressourcen und nicht nachwachsenden Rohstoffen. 50% der weltweiten Stahlproduktion und jährlich 3 Milliarden Tonnen Rohstoffe werden für Bauprojekte aufgewendet [15]. Auch bezüglich des Energieverbrauchs und CO₂-Emissionen nimmt der Sektor vorderste Plätze unter den Top-Verbrauchern ein. Der Gebäudesektor verantwortet ca. ein Drittel des weltweiten Endenergieverbrauchs. Legt man die Primärenergie zugrunde, sind 40% der gesamten CO₂-Emissionen diesem Sektor zuzuordnen [16].

Allein ca. 6% der globalen CO₂-Emissionen rühren aus der Zementherstellung [17], mehr als durch die gesamte Luftfahrt [18]. Das meiste davon entweicht infolge des chemischen Prozesses. 2016 wurden ca. 34 Milliarden Tonnen Beton produziert, ca. 1000 Tonnen pro Sekunde. Von dieser Menge kann eine Mauer um den Äquator erstellt werden, über 2 Kilometer hoch [19]. Unvorstellbare Mengen von Zuschlagstoffen, wie Sand und Kies sind hierfür jährlich erforderlich, Tendenz steigend. Weltweit sind diese Rohstoffe zwar in großen Mengen vorhanden; deren Beschaffung wird zunehmend kostspieliger mit besonders besorgniserregenden Auswirkungen auf marine Ökosysteme [20],[21].

2 Bauen hat traditionell eine geringe Produktivität - noch

Bislang hatte der technologische Fortschritt eher langsam Eingang in den Bausektor gefunden. Mit dem Resultat, dass dessen Produktivität in den vergangenen 50 Jahren nicht nur nicht mit den stationären Industrien mithalten können, sondern absolut abgenommen hat [2],[3]. Diese geringe Produktivität des Bausektors im Vergleich zu anderen Industrien hat vielschichtige Gründe.

Das Baugeschäft zeichnet sich durch eine ausgeprägte Projektbezogenheit aus. Darüber hinaus sind technische, logistische, kaufmännische sowie behördliche Anforderungen mit zahlreichen und wechselnden Beteiligten zu erfüllen. Bauherren, Planer, Ausführende, Lieferanten, Nachunternehmer, Nutzer, Behörden, Anwohner – alle möchten gehört sein was wiederum die typische regionale Verbundenheit des Baugeschäfts begründet. Planungsänderungen nach Baubeginn sind keine Seltenheit und bei Straßenbauprojekten bewegt sich die Produktionsstätte in den meisten Fällen „unter rollendem Rad“. Jeder Eingriff in das Erdreich sorgt nicht selten trotz gründlicher Baugrunduntersuchungen für Überraschungen. Damit ändern sich die Randbedingungen häufig und schnell. Das führt dann auch mal dazu, dass die Ausführung begonnen wird, obschon die Planung noch nicht fertig ist – „baubegleitende Planung“ heißt es dann. Entsprechend vielseitig, ad-hoc und unübersichtlich ist mit derart vielen Schnittstellen meist der Umgang mit den für

Entscheidungen erforderlichen Informationen. Das Ausmaß des Informationsverlustes nimmt mit der Anzahl der Schnittstellen zu. Beispielsweise entsteht an der Schnittstelle zwischen Bauphase und Inbetriebnahme ein großes Defizit. Für die Auftraggeber-schaft bedeutet dies bei Korrekturen und Sanierungen die aufwendige Wiederbeschaffung von Informationen, die bislang nirgendwo zentral gesammelt worden waren.

Gerade wegen dieser Unwägbarkeiten sind sehr erfahrene Projektbeteiligte wesentlich für die erfolgreiche Projektausführung. Daher ist im Baugeschäft der Anteil impliziten Know-hows besonders ausgeprägt, was einen intensiven, unmittelbaren und persönlichen Austausch erfordert – und weiter fördert. Das erklärt die noch weitverbreitete analoge Steuerung von Baustellenprozessen. Dass Materialtransporte mit Strichlisten erfasst und mit papiernen Lieferscheinen abgerechnet werden. Dass Sicherheitsbegehungen noch händisch protokolliert und abgelegt werden. Dass Bewehrungsabnahmen viel Zeit in Anspruch nehmen, weil Formulare ausgefüllt und abgelegt sein wollen. Dass die Anzahl der erforderlichen Walzenüberfahrten zur Verdichtung von Straßenasphaltbelägen zuweilen noch per Handzeichen kommuniziert werden. Dass die Disposition von Mensch und Maschine sehr häufig noch mit Listen gesteuert wird. Diese Merkmale erzwingen förmlich ein sequenzielles Handeln der Projektbeteiligten. Planungs- und Baufirmen, Lieferanten und Nachunternehmer werden nacheinander beauftragt.

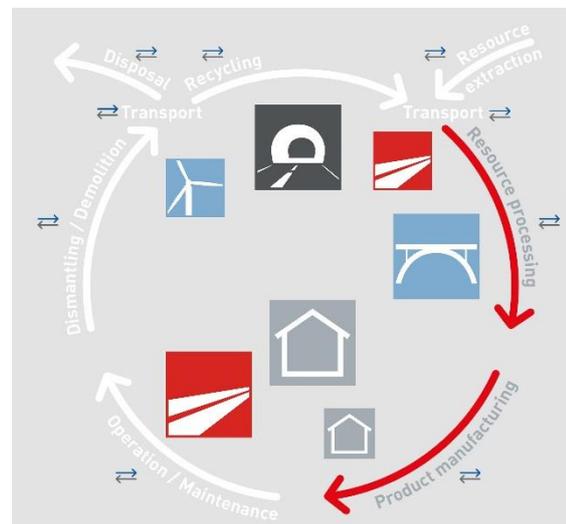


Abb. 1: Bauen heute - in der Lebenszyklusdarstellung

Abbildung 1 illustriert die wesentlichen Merkmale, wie heute meist noch gebaut wird, im Kontext des Lebenszyklus' schematisch. In jedem Geschäftsfeld werden projektweise Bauobjekte errichtet. Selbst der Informationsaustausch zwischen den Gewerken innerhalb eines Projekts hängt häufig von Einzelper-

sonen oder der individuellen Organisation ab. In jedem Lebenszyklusabschnitt ist Energie erforderlich, die als Emissionen in die Umwelt gelangen. Je nach Wertschöpfungstiefe der Bauunternehmung werden Baustoffe veredelt, Bauteile beschafft - und durch das Bauunternehmen im Konzert mit den Planern, Nachunternehmern und Lieferanten zusammengesetzt. Die dafür erforderlichen Informationen werden meist bilateral und projektbezogen verteilt und abgelegt. Das Projekt-Knowhow des Zusammenführens ist damit in der Regel implizit, die Informationen siloartig bei den Beteiligten verteilt und damit oft mehrfach und nicht verknüpfbar abgelegt. Alles Merkmale, die eine nahezu sequentielle Herstellung von Bauwerken fördert.

3 Die Verheißung vernetzender Technologien

Die augenblickliche und grenzenlose Kommunikation - ermöglicht durch eine nicht zu versiegen scheinende Innovationskraft der Informationstechnologien - sowie der radikale Preisverfall für Rechner- und Speicherkapazitäten verändern maßgeblich sämtliche industrie- und damit produktionsbezogenen Prozesse. Sensoren sind inzwischen so klein, handlich und robust geworden, dass unsere gesamte Umwelt damit bestückt werden kann. Und damit auch die bebaute Welt, die wir als Baukonzern mitgestalten. Initiativen wie „Planetary Skin“ von Cisco oder Hewlett Packards „Central nervous system for the Earth (CeNSE)“ kündigen unter dem Begriff des „smart dust“ Millionen weiterer an das Internet angeschlossener Sensoren an [4]. Deren Datenströme, geführt über das Internetprotokoll IPv6, das mehrere Tausend Internetadressen auf jeden Quadratmeter der Erdoberfläche ermöglicht und verknüpft über den künftigen 5G-Telekommunikationsstandard, werden zukünftig eine wahrnehmende Umgebung schaffen - wir sprechen vom Beginn des kognitiven Zeitalters [5]. Aufgrund der enormen Leistungsfähigkeit der datenverarbeitenden Zwischen- und Endgeräte stehen daher nahezu beliebige Informationen an jedem Ort und zu jeder Zeit sofort bereit - und ermöglicht aus technologischer Sicht eine bisher nicht dagewesene Art der Zusammenarbeit zwischen zahlreichen Personen und gar Gruppen über beliebige Standorte hinweg. Mittels hochgradiger Visualisierungstechnologien können damit komplexe Vorgänge dargestellt und vermittelt werden, die sich ein Mensch sonst kaum mehr vorstellen vermag.

Diese technologischen Möglichkeiten beschleunigen nicht nur die Verarbeitung von Daten und Informationen. Das große prognostizierte Potenzial zur deutlichen Steigerung von Produktivität, Wertschöpfung sowie der Qualität im Bausektor [2], [6], [7], [8] wird auch durch die enormen Fortschritte bei

mobilen und (teil)-autonomen und code-gesteuerten Produktionsmöglichkeiten erwartet, welche durch die verknüpfenden Informations- und Kommunikationsmöglichkeiten nun möglich werden.

4 Das Bauwerk – ein Produkt über den Lebenszyklus gedacht

Diese neuen Möglichkeiten zur Herstellung und des Betriebes von Bauobjekten erfordern einen neuen Ansatz der Planung. Vor etwa 30 Jahren begannen Architekten mit CAD die ersten 3-D-Zeichnungen. Daraus entwickelte sich zunächst das Building Information Modelling, bekannt unter dem Akronym BIM. Inzwischen werden an das 3-D-Geometriemodell Informationen zu Materialien, Kosten, Terminen etc. verknüpft, was auch als „5D“ Eingang in die BIM-Szene gefunden hat - und BIM zum *Building Information Management* hat werden lassen.

Das modellbasierte Arbeiten mit BIM ist deshalb so mächtig, weil der Mensch visuell aufbereitete Informationen, v.a. wenn verknüpft mit vertrauten Objekten, wie der dreidimensionalen Darstellung eines Gebäudes, rasch aufnehmen und verarbeiten kann. Was bisher nur erfahrenen Planern vorbehalten war, aus zweidimensionalen, mit kryptischen Symbolen verzierten Plänen, aus Schnitten, Grundrissen und zahlreichen Ansichten kraft ihres Vorstellungsvermögens im Geiste ein Bauwerk entstehen zu lassen, kann dieses nun mittels der digitalen Werkzeuge von allen Beteiligten und vor allem ohne Informationsverlust *gesehen* werden. Auch von denjenigen, deren dreidimensionale Abstraktionsfähigkeit geringer ausgeprägt ist. 3D-Darstellungen existierten zwar schon seit jeher - als physikalische Modelle - in erster Linie zu Visualisierungszwecken für den Bauherrn in der Entwurfsphase, hatten jedoch meist eher den Charakter abstrahierter künstlerischer Darstellungen und waren daher für Planungsänderungen während des Projektverlaufes nicht geeignet.

Im Idealfall ermöglichen BIM-basierte Entwürfe den Baubeteiligten, an einem virtuellen (oder digitalen) Zwillings Änderungen, Varianten, Sanierungen und Ausbauten von der technischen Planung über die Erstellung von Leistungsverzeichnissen und Materiallisten bis hin zu den damit verbundenen Kosten nachvollziehbar vorwegzunehmen. Somit rückt eine im Bau schon lang angestrebte Kosten-, Planungs- und Terminalsicherheit in greifbare Nähe. Informationslücken und Kollisionen in den einzelnen Fachbereichen und Disziplinen können dann rechtzeitig identifiziert und teure Planungs- und Abstimmungsfehler vermieden werden. Insbesondere in der Baubranche mit Gewinnmargen im niedrigen einstelligen Bereich - zum Vergleich: im Autobau liegt sie bei 10 %, bei Software sogar bei 33 % - kann das

hinsichtlich des wirtschaftlichen Erfolgs des Projekts entscheidend sein.

Dieser Ansatz erzwingt immer mehr Entscheidungen an den Anfang des Bauprojektes – auf die Planung. Die Baubeteiligten, allen voran Auftraggeber und Auftragnehmer legen dann im „front-loaded design“ die Randbedingungen und Vorgehensweise fest. Und in die Zukunft blickend: für den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks. Entsprechend ist eine Abstimmung zwischen allen Beteiligten vom Zeitpunkt der Projektkonzeption erforderlich. Partnerschaftsmodelle, bei der Auftraggeber und Ausführende mit offenen Visier miteinander kooperieren, werden von der modellbasierten Arbeitsweise profitieren.



Abb. 2: Lebenszyklusdarstellung „Bauen von morgen“.

Abbildung 2 illustriert schematisch im Lebenszyklus, wie die „Bebaute (Um)Welt von morgen“ miteinander vernetzt sein wird. In jedem Geschäftsfeld werden nach wie vor Bauobjekte projektweise errichtet. Die Planung ist umfassender, auch Aspekte aus dem späteren Betrieb fließen detailliert ein. Daten und Informationen aus unterschiedlichen Projekten können ausgewertet werden, auch über Geschäftsfelder hinweg. Baustoffe und Bauteile werden auf Ihre Funktionalität im gesamten Lebenszyklus hin bewertet. Aspekte der Kreislaufwirtschaft können berücksichtigt und bewertet werden. Selbst im Betrieb sind Objekte aus unterschiedlichen Geschäftsfeldern miteinander auf einer Datenbasis miteinander verknüpft. Brücken- und Tunnelstände werden überwacht, Gebäude werden bedarfsweise und witterungsabhängig mit erneuerbarer Energie versorgt - und versorgen selber z.B. Elektrofahrzeuge. Das Know-how von Bauprojekten ist explizit auf

Datenbanken vorhanden und lässt sich z.B. über einen Big Data Ansatz auswerten.

5 Bedeutung für die bebaute Umwelt

Die Frage ist nicht nur, wie diese Entwicklungen unsere tägliche Bautätigkeit beeinflussen, sondern welche Systemlösungen entwickelt werden können, die einen Nutzen für Kunden und Gesellschaft schaffen. Und welche Geschäftsmodelle sich daraus ergeben – und welche Marktteilnehmer diese erfolgreich entwickeln.

Fahrzeuge und Gebäude oder Fahrzeuge und Straßen werden zum gegenseitigen Nutzen in nahezu Echtzeit vernetzt. Zustände, seien es Gebrauchszustände von Brücken oder die eisbedingte Rutschgefahr auf Fahrbahnen, können inzwischen mittels des Internets der Dinge autark erkannt werden und entsprechende Mitteilungen an Wartungsdienste auslösen. Die Sensorik im Fahrzeug überwacht nicht nur dessen Zustand, sondern erfasst jede Bodenunebenheit. Damit können Straßenzustände kontinuierlich kartiert werden, analog der via App angezeigten Verkehrsdichte. Die präventive Wartung könnte aus technischer Sicht dann auch für Straßen möglich sein.

6 Bedeutung für die Bauindustrie

All diese Entwicklungen werden sich auch auf die Bautätigkeit auswirken und damit auf die Beteiligten und deren Expertise. Branchenübergreifende Kooperationen ermöglichen einerseits die Erschließung neuer Märkte, locken andererseits neue Marktteilnehmer, wie das Beispiel Google bei der Gebäudeautomation oder bei der Einführung des fahrerlosen PKW beweist. Auch in der Bauwirtschaft werden neue Geschäftsmodelle entwickelt, wie die Rhombert-Tochter CREE [22] oder das Unternehmen katerra [23] zeigen. Deutlich wird: Systemlösungen mit konkretem Nutzen für Kunden und Gesellschaft stehen im Vordergrund. Ideale Anwendungsfelder in der Bauwelt sind bezahlbares Wohnen in nachhaltigen Bezirken in der Stadt von morgen [12].

Aus Sicht eines großen, international agierenden Generalunternehmers, der in zahlreichen Geschäftsfeldern des Bauwesens tätig ist, erwachsen aus diesen Randbedingungen für den Bausektor im Allgemeinen und die Bauindustrie im Besonderen erweiterte und auch neue Aufgaben, die sich ergeben aus:

- dem Wunsch von Bauherren, infolge der unaufhaltsamen Verbreitung von immer leistungsfähigeren Planungs-, Bemessungs- und Produktionswerkzeugen sehr komplexe, nie zuvor dagewesene (Groß)Projekte in immer kürzeren Bauzeiten zu realisieren

- den Möglichkeiten neuartiger Instrumente, wie Drohnen, mit denen Dach- und Fassadenabnahmen im Industriebau rasch und beliebig detailliert erledigt oder Vermessungsarbeiten im Straßen- und Erdbau sehr viel schneller und genauer als bisher durchgeführt werden können
 - der Notwendigkeit heraus, nachhaltiger bauen zu müssen, das Recycling von Bauteilen und Baustoffen in nennenswerten Mengen zu erhöhen, neuartige Materialien wie Faserverbundstoffe oder Kompositmaterialien verarbeiten zu können
 - der Anforderung heraus, die umfassende Umsetzung von Bauwerken zu realisieren, denn die Nutzungszyklen werden immer kürzer. Bemessen werden Gebäude häufig auf 30 Jahre; wobei die Rohbauten auch weit über 100 Jahre standhielten ...
 - Dem Erfordernis heraus, IT-Architekturen und -Infrastrukturen bereitstellen zu müssen, um das angestrebte Ausmaß der multilokalen Zusammenarbeit zwischen den Baubeteiligten zu etablieren
 - der Flut - bedingt durch die Start-Up-Szene - von immer mehr auf dem Markt erscheinenden Softwareapplikationen, die sich vielfältiger Aufgaben im Bauwesen annehmen, wie Disposition von Mensch, Maschine und Material, zum Monitoring von Einbauleistungen und -fortschritte u.v.m.
 - Der Notwendigkeit, eine Datenhaltung zu beherrschen, die mit großen Daten- und Informationsmengen aus zahlreichen und unterschiedlichen Software-Applikationen (und damit Formaten) gespeist wird
 - Der Beschäftigung mit der rasanten Entwicklung der Robotik, mittels derer autonom agierende Roboter Arbeitsfortschritte in Gebäuden, Lagerbestände oder Mängel automatisch erfassen können oder beim Gebäudebetrieb assistieren [10]. Dort können sie Innenräume scannen, bei der Navigation in Gebäuden das Auffinden von Revisionsöffnungen anhand von 3D-Gebäudeplänen unterstützen, Betriebszustände mittels der im Gebäude eingebetteten Sensorik abfragen sowie die fallspezifischen Unterlagen bereitstellen, damit die angeforderten Wartungsarbeiten rasch und fehlerfrei erledigt werden können.
 - Der Entwicklung des 3D-Drucks für das Bauwesen. Von der additiven Fertigung, die mörtelt und mauert, bis zum Schweißen verschiedener Stähle. „Gedruckt“ werden können inzwischen zahllose Materialien. Für den Bausektor sind Kompositmaterialien, Mörtelgemische, Stahl und Harze bedeutsam. Damit eröffnet die skalierbare Robotik dem Bauwesen neue Optionen.
 - Den Möglichkeiten neuartiger Werkzeuge für die gewerblichen MitarbeiterINNEN, wie z.B. Exoskelle, welche die Leistungsfähigkeit bei schweren Arbeiten erhöhen und diese in Bau-Cyborgs verwandeln [9].
 - Den ersten erfolgreichen Pilotanwendungen im Straßenbau, bei der erstmals in Deutschland im Zuge der Cloud-gestützten Prozessoptimierung in einem Straßenbauvorhaben autonom fahrende Walzen getestet wurden [11].
 - Der Möglichkeit, mit sensorbestückte Arbeitskleidung, Helmen und Baumaschinen nicht zuletzt die Menschen auf Baustellen besser geschützt; lassen die unmittelbar Beteiligten schneller erkennen, ob sich jemand in einem Gefahrenbereich bewegt.
 - strenger werdenden Auflagen an den Ressourcenverbrauch für interne Prozesse, wie Treibstoff für die Baumaschinen und Fahrzeuge, Kohlestaub und Gas für den Betrieb der Asphaltmischanlagen.
 - der zunehmenden Erwartung, aufgrund all dieser technologischen Mittel, die geplante Qualität selbstverständlich abzuliefern
 - dem Spannungsbogen zwischen den rasch veränderten Randbedingungen und den bestehenden Ausschreibe- und Vergaberichtlinien, bei denen der Preiswettbewerb noch im Vordergrund steht.
- Das sind nur einige prominente Beispiele für Aufgaben, die eine erhöhte Komplexität bei Bauprojekten und Betrieben von Bauobjekten widerspiegeln und demonstrieren, dass digitale Daten das Bauen bereits stark verändern. Für die eine entsprechende Expertise aufgebaut werden muss, mit Berufsbildern, wie sie vor wenigen Jahren noch gar nicht existierten. Wobei angenommen wird, dass sämtliche relevante Informationen in naher Zukunft digitalisiert verfügbar sein werden. Nicht nur aktuelle Informationen, sondern auch historische, bislang analog erstellte und archivierte Daten und Informationen. Und auch neuartige Daten, die bislang noch gar nicht existierten, weil sie schlichtweg bis vor kurzem technologisch nicht vorstellbar waren.
- Von zentraler Relevanz ist die Frage: Wem gehören die Daten, die auf Plattformen, den digitalen Marktplätzen, von den Baubeteiligten genutzt werden und dort zu neuen Daten, Informationen und vor allem neuen Erkenntnissen führen? Fest steht: Daten sind das Neue Öl [13] und auch in der Bauindustrie stellen wir uns die Frage, wie die gewünschte und zur Erhöhung der Produktivität erforderliche Integration der Bauabläufe - was mit dem Zusammenführen der dazu nötigen Daten einhergeht - vor dem Hintergrund gelingen kann, dass diejenigen einen deutlichen Mehrwert erzielen werden, welche die Daten besitzen, interpretieren und Geschäfts-

modelle daraus entwickeln. Für ein Generalunternehmen, deren Vermögenswerte zu großen Teilen aus leicht digitalisierbaren Daten und Informationen bestehen, mit denen wir unsere Planungs-, Bau- und Betriebsprozesse steuern, kann diese Fragestellung existentiell sein.

7 Wie bauen wir zukünftig?

Die Zukunft des Bauens ist Partnerschaft - mit der voranschreitenden Erweiterung der Funktionalitäten von Materialien und Bauteilen zu systemischen Modulen und dem Anspruch, Bauwerke über deren Lebenszyklus vorausdenken, wächst die Komplexität moderner Bauprojekte. Damit steigen die Anforderungen an die Menschen, die sie realisieren sollen. Der erfahrene Bauleiter und der Polier werden weiterhin erforderlich sein, ihre Aufgaben werden sich jedoch verändern. In einigen Fällen werden wir ganz umdenken müssen. Was macht der Architekt, wenn die Produktionsmethoden Bauteile und Strukturen erschaffen können, die man gar nicht planen kann? Im Bausektor entwickeln sich daher ganz neue Berufsbilder, wie der BIM-Manager, der die Bauwerksmodelle bei der Umsetzung auf der Baustelle steuert. BIM-Modeller erstellen die virtuellen Zwillinge der Bauobjekte. Lean Construction Experten übertragen bereits heute schon Methoden aus der Automobilproduktion, um die Anteile von Verschwendung systematisch und kontinuierlich zu reduzieren. Gemeinsam mit Prozessanalysten erarbeiten sie die Grundlagen für Prozessstandards, explizit formulierte Vorgehensweisen, um künftig Abläufe, z.B. mit Workflow-Werkzeugen, mit einer höheren Produktivität und Qualität robuster auszuführen.

Programmierer verknüpfen die Modelle mit Internet-of-Things-Daten und Datenanalysten setzen selbstlernende Algorithmen der Künstlichen Intelligenz ein, um den Mehrwert aus den großen Datenmengen maschinell zu destillieren. Diese neuen Aufgaben werden andere Menschen für das Bauen interessieren als bisher, wie es allein schon die Start-up Szene mit zahlreichen baurelevanten Lösungen zeigt [14].

Der Bausektor wird von dieser größeren Diversität profitieren. Und die bebaute Umwelt, in der wir alle leben.

8 Literatur

- [1] Global Insights. 6/2016
<https://www.ihs.com/industry/economics-country-risk.html>.
- [2] Shaping the future of Construction. A breakthrough in Mindset and Technology. Industry Agenda by World Economic Forum. 2016.
- [3] McKinsey Global Institute, 2017. Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity. In Collaboration with MCKinsey's Capital Projects & Infrastructure Practice
- [4] Evans D.: The Internet of Things - How the Next Evolution of the Internet of Things is Changing everything. Cisco Internet Business Solutions Group - White Paper, 2011.
- [5] Kelly K., 2016. The Inevitable - Understanding the 12 technological forces that will shape our future. Viking.
- [6] Hypovereinsbank 2016. Bauwirtschaft im Wandel. Trends und Potenziale bis 2020.
- [7] Shaping the future of Construction. Inspiring Innovators refine the Industry. Industry Agenda by World Economic Forum. 2017
- [8] Voices on infrastructure. Rethinking engineering and construction. Global Infrastructure Initiative 2016. By McKinsey & Company. Oct 2016.
- [9] MAX (SuitX)
<https://www.youtube.com/watch?v=7MRS1qOxpV4>.
- [10] www.navvis.co
- [11] <http://smartsite-project.de/>.
- [12] Bareiß R., Pralle N. (2014). Bauen Im Zeitalter des Internets (der Dinge). Relevante Trends bei Gebäuden, Städten, Mobilität - und zukünftige Erfolgsfaktoren. Bauingenieur Verlag VDI Bautechnik.
- [13] Economist 2017. Regulating the internet giants. The world's most valuable resource is no longer oil, but data. Economist May 6th, 2017.

- [14] <https://angel.co/angel-funds>
- [15] World Economic Forum 2016: Shaping the Future of Construction - A Landscape in Transformation
- [16] UNEP 2016: Towards zero-emission efficient and resilient building
- [17] Global CO2 emissions from cement production, Robbie M. Andrew, Earth Syst. Sci. Data, 10, 195-217, 2018
- [18] <https://www.bdl.aero/de/veroeffentlichungen/energieeffizienzreport/energie-effizienz-report-2012/>
- [19] Sobek, 16.11.2017, Innovationskongress Villach
- [20] Zukunftsblog | Zukunftsstädte Von: Prof. Dirk Hebel, Singapore-ETH Centre, Sand (Teil 2): nachhaltige Alternativen
- [21] UNEP Global Environmental Alert Service. Sand, rarer than one thinks. March 2014
- [22] <http://www.creebyrhomborg.com/>
- [23] <https://katerra.com/>

Autoren

Dr.-Ing. Norbert Pralle

Ed. Züblin AG
Albstadtweg 3
70567 Stuttgart

Franz-Josef Klager, M.Sc.

STRABAG AG
Donau-City-Straße 9
1220 Wien

Programm des Symposiums

21. März 2018, Großer Hörsaal Bauingenieurwesen, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

9:00 Uhr	Anmeldung Kaffee	14:00 Uhr	Neuartige Bindemittel – Die Zeit nach dem Portlandzement Prof. Dr.-Ing. Horst-Michael Ludwig Universität Weimar
9:30 Uhr	Begrüßung Moderation Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Dipl.-Ing. Eckhard Bohlmann Verband Deutscher Betoningenieure e. V. Dipl. Wirtsch.-Ing. Ulrich Nolting InformationsZentrum Beton GmbH	14:30 Uhr	Gesteinskörnung – von natürlicher bis rezyklierter Körnung Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit Technische Universität Kaiserslautern
9:45 Uhr	Technikfolgenabschätzung zum Thema Betone der Zukunft – Herausforderungen und Chancen Dr. Matthias Achternbosch Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	15:00 Uhr	Kaffeepause
10:15 Uhr	Calcium-Silikat-Hydrat – Unverzichtbarer Bestandteil von Beton Dr.-Ing. Michael Haist Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	15:30 Uhr	Bemessungsrelevante Kennwerte zukünftiger Betone und deren Abbildung in Regelwerken Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
10:45 Uhr	Kaffeepause	16:00 Uhr	Anforderungen an das Bauen der Zukunft aus der Sicht eines Generalunternehmers – oder: Die Gestaltung der Bebauten Umwelt Dr.-Ing. Norbert Pralle Ed. Züblin AG
11:15 Uhr	Dauerhafte Betone mit kalksteinhaltigen Zementen Dr.-Ing. Christoph Müller Verein Deutscher Zementwerke	16:30 Uhr	Zusammenfassung Schlusswort Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Dipl.-Ing. Eckhard Bohlmann Verband Deutscher Betoningenieure e. V. Dipl. Wirtsch.-Ing. Ulrich Nolting InformationsZentrum Beton GmbH
11:45 Uhr	Flugasche und Hüttensand – Zusatzstoffe mit Zukunft? Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz Technische Universität München	16:40 Uhr	Umtrunk Imbiss
12:15 Uhr	Calcinierte Tone und ihr Potenzial für die moderne Betontechnologie Prof. Dr.-Ing. Karl-Christian Thienel Dr.-Ing. Nancy Beuntner Universität der Bundeswehr München		
12:45 Uhr	Mittagspause		

Autorenverzeichnis

14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung „Betone der Zukunft – Herausforderungen und Chancen“

Dr. Matthias Achternbosch

Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Karlstraße 11, 76133 Karlsruhe

Robert Adams

Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen, TU Kaiserslautern, Gottlieb-Daimler-Str. Geb. 60, 67663 Kaiserslautern

Dr.-Ing. Nancy Beuntner

Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39,
85579 Neubiberg

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit

Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen, TU Kaiserslautern, Gottlieb-Daimler-Str. Geb. 60, 67663 Kaiserslautern

Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Gotthard-Franz-Straße 3, 76131 Karlsruhe

Dipl.-Ing. Bianca Dornisch-Bund

Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen, TU Kaiserslautern, Gottlieb-Daimler-Str. Geb. 60, 67663 Kaiserslautern

Dr.-Ing. Michael Haist

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Gotthard-Franz-Straße 3, 76131 Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz

Centrum Baustoffe und Materialprüfung, TU München, Baumbachstraße 7, 81245 München

Dr.-Ing. Anne Heisig

Centrum Baustoffe und Materialprüfung, TU München, Baumbachstraße 7, 81245 München

Franz-Josef Klager, M.Sc.

STRABAG AG, Donau-City-Straße 9, 1220 Wien

Prof. Dr.-Ing. Horst-Michael Ludwig

F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus Universität Weimar, Coudraystraße 11b, 99423 Weimar

Dr.-Ing. Christoph Müller

Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ), Tannenstraße 2, 40476 Düsseldorf

Dr.-Ing. Norbert Pralle

Ed. Züblin AG, Albstadtweg 3, 70567 Stuttgart

Dipl.-Ing. Julia Scheidt

Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen, TU Kaiserslautern, Gottlieb-Daimler-Str. Geb. 60, 67663 Kaiserslautern

Prof. Dr.-Ing. Karl-Christian Thienel

Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39,
85579 Neubiberg

Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung

Themen vergangener Symposien (2004-2017)



1. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Instandsetzung bedeutsamer Betonbauten der Moderne in Deutschland
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Vogel, M. Haist
ISBN 978-86644-098-2



2. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Sichtbeton - Planen, Herstellen, Beurteilen
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 3-937300-43-0



3. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Innovationen in der Betonbautechnik
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 3-86644-008-1



4. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Industrieböden aus Beton
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-120-0



5. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Betonbauwerke im Untergrund - Infrastruktur für die Zukunft
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-214-6



6. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Dauerhafter Beton - Grundlagen, Planung und Ausführung bei Frost- und Frost-Taumittel-Beanspruchung
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-341-9



7. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Beherrschung von Rissen in Beton
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-487-4

bitte wenden



8. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Schutz und Widerstand durch Betonbauwerke bei chemischen Angriff
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-654-0



9. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Nachhaltiger Beton – Werkstoff, Konstruktion und Nutzung
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist, M. Kromer
ISBN 978-3-86644-820-9



10. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Gestalteter Beton – Konstruieren in Einklang von Form und
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist, M. Kromer
ISBN 978-3-73150-179-4



11. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Betonverformungen beherrschen – Grundlagen für schadensfreie Bauwerke
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist, M. Kromer
ISBN 978-3-7315-0343-9



12. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Bauwerkserhaltung – Instandsetzung im Beton- und Stahlbetonbau
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-7315-0474-0



13. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Sicherheit durch Beton – Schutz vor Explosion, Brand und Risikostoffen
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, J. Link
ISBN 978-3-7315-0629-4

Alle Bände sind kostenfrei als Download bei **KIT Scientific Publishing** (<http://www.ksp.kit.edu>) oder für einen Unkostenbeitrag im Buchhandel erhältlich

Die Bauwirtschaft und insbesondere der Betonbau unterliegen einem rasanten Wandel. Portlandzement wird zunehmend durch Ersatzstoffe wie Flugasche oder Hütten sand verdrängt. Bereits heute übersteigt die Nachfrage nach Ersatzstoffen das verfügbare Angebot. Diese Ressourcenknappheit führt neben Emissionsaspekten zur weltweiten Forschung an einer Vielzahl neuer Alternativen zu Portlandzement, deren aktuelle Entwicklungsstadien sich zwischen frühen Entwicklungsstufen und Marktreife befinden. Exakte Zukunftsprognosen sind schwer zu erstellen, jedoch scheinen in Zukunft einzelne Bindemittel wie Portlandzement durch Kombinationen aus mehreren, gezielt aufeinander abgestimmten Bindemitteln und Feinstoffen abgelöst zu werden. Auch ist absehbar, dass rezyklierte Gesteinskörnungen zukünftig eine stärkere Rolle bei der Betonherstellung spielen werden. Zielsetzung des 14. Symposiums Baustoffe und Bauwerkserhaltung ist es, Ihnen einen Überblick über diese Entwicklungen zu geben und diese hinsichtlich Ihrer Auswirkungen auf die zukünftige Betontechnologie sowie das zukünftige Bauen zu bewerten.

Das Programm der Veranstaltung beginnt mit der Vorstellung von Bewertungsmethoden, mit denen die Folgen von technischen Änderungen für einzelne Projekte, das eigene Unternehmen oder das Bauen insgesamt beurteilt und quantifiziert werden können. Da Calcium-Silikat-Hydrat auch in nahezu allen neuen Bindemittelansätzen weiterhin das maßgebende Hydratationsprodukt ist, wird im folgenden Vortrag die Struktur dieses Binders erläutert. Anschließend folgt eine Vorstellung der Möglichkeiten, die sich durch Zementersatzstoffe wie Gesteinsmehle, Hütten sand und Flugasche oder calcinierte Tone bieten. Nachfolgend werden Ihnen Alternativen zum Portlandzement vorgestellt und deren Potentiale beleuchtet. Auf die Einsatzmöglichkeiten der rezyklierten Gesteinskörnung und die Konsequenzen einer Verschiebung der normativen Regeln hin zu Performance-Konzepten wird in zwei weiteren Vorträgen eingegangen. Dem zeitlichen Wandel unterliegen auch die Anforderungen an Bauwerke und Baustoffe. Die Veranstaltung schließt daher mit einem Vortrag zur Zukunft des Bauens.