

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. $C/S = 1,7$ 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]).

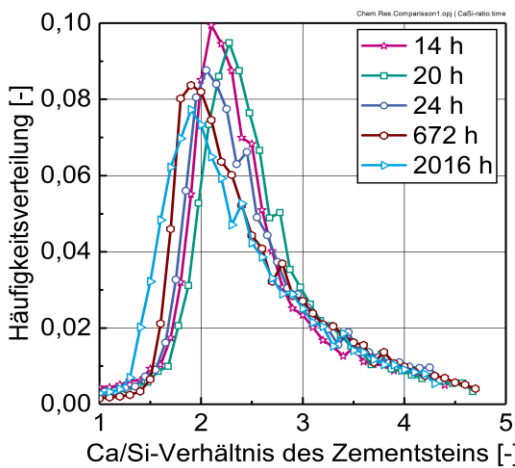


Abb. 1: Häufigkeitsverteilung des Ca/Si-Verhältnisses in Zementstein in Abhängigkeit vom Alter und damit dem Hydratationsgrad der Probe

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]).

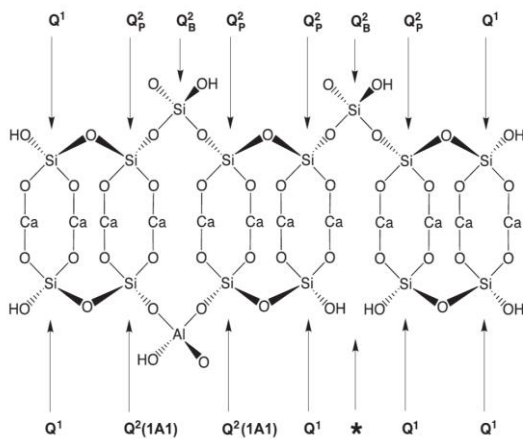


Abb. 2: Chemische Struktur eines CSH-Nanopartikels [9]

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.

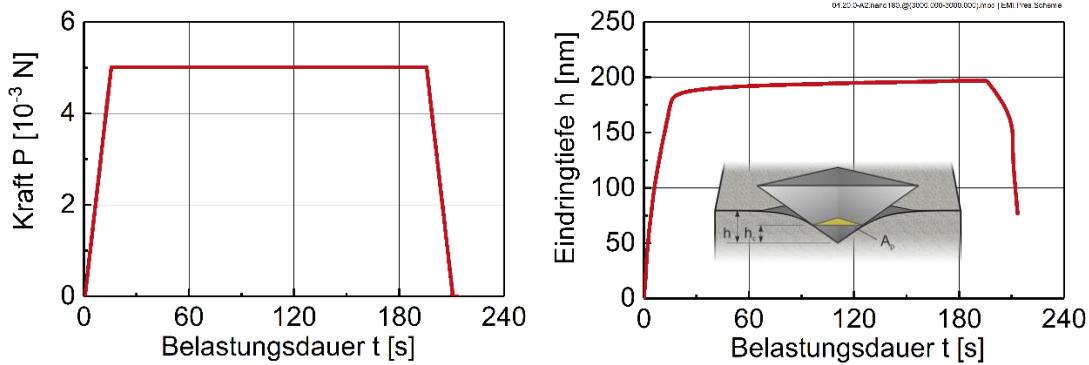


Abb. 3: Schema und zeitlicher Ablauf des Indentationsversuchs: Zeitlicher Verlauf der Belastung (links) und der Eindringtiefe des Indenters (rechts)

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.

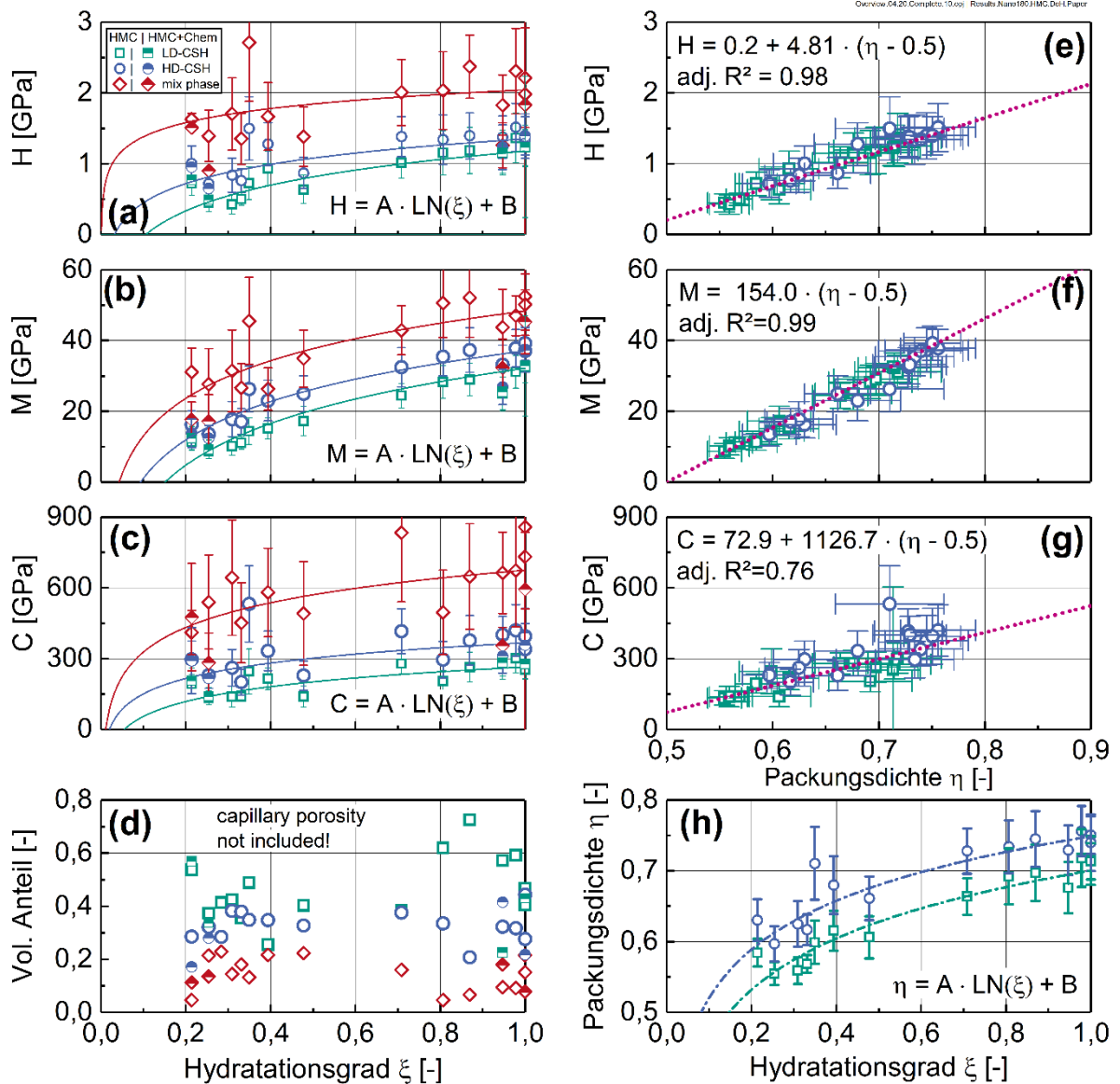


Abb. 4: Mechanische Eigenschaften H (Abb. a und e), M (Abb. b und f) und C (Abb. c und g) für die mittels Nanoindentation und finiter Mischungsmodellierung identifizierte Zementsteinphasen LD- und HD-CSH sowie einer Mischphase als Funktion des Hydratationsgrads ξ (links) bzw. der Packungsdichte η (rechts);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

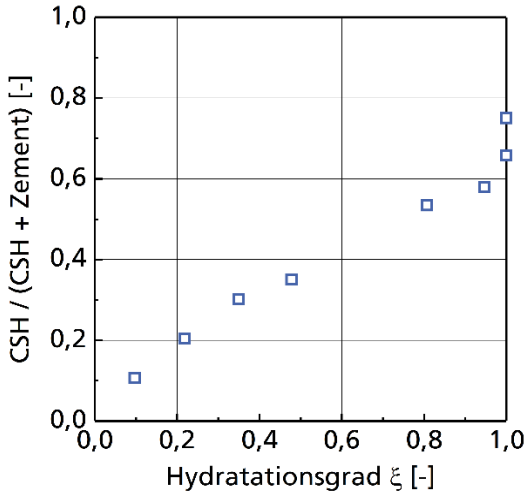


Abb. 5: Zeitliche Entwicklung des durch die Hydratation gebildeten Anteils an LD- und HD-CSH-Phasen bezogen auf die Summe aus CSH-Gel und Zement ermittelt mittels Si-NMR Untersuchungen (Details zur Methode siehe [9]).

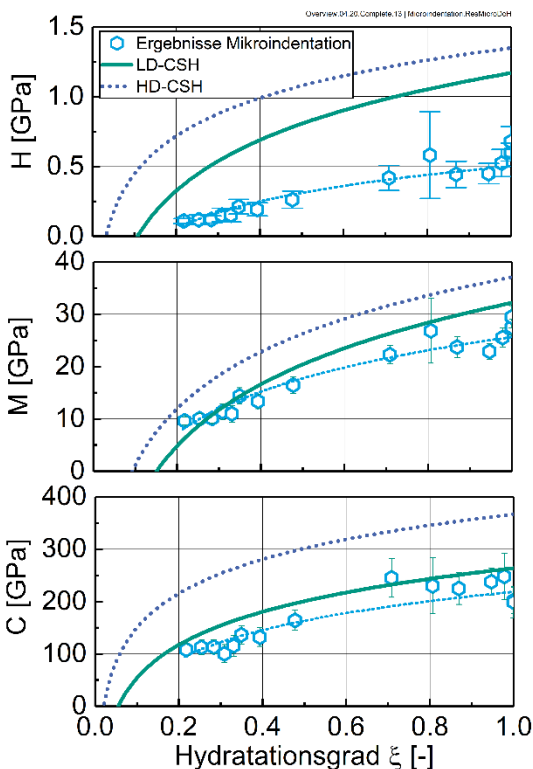


Abb. 6: Vergleich von Ergebnissen von Mikroindentationsuntersuchungen an Zementstein mit den mittels Nanoindentation ermittelten Eigenschaften von LD- und HD-CSH

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