



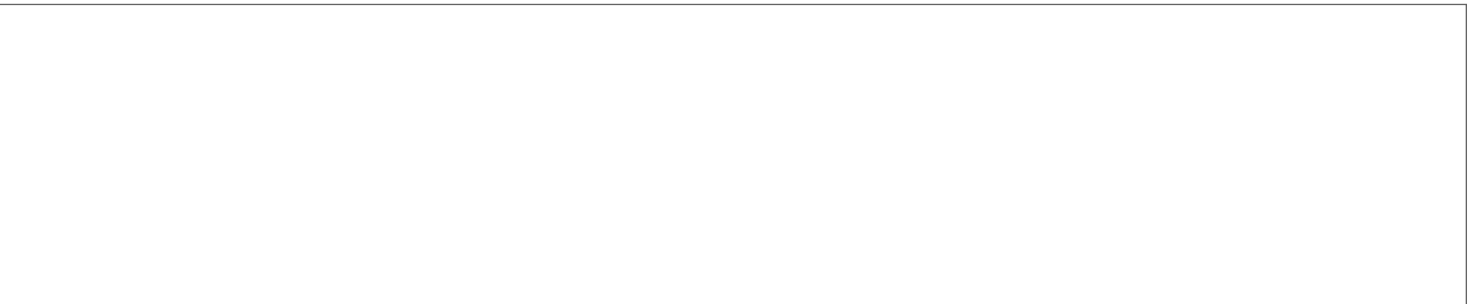
Betonausgangsstoffe und -technologie, Betonbautechnik

Bei der Zementherstellung gewinnen Portlandkompositzemente zunehmend an Bedeutung, da die Zementwerke einen Beitrag zur Reduzierung der CO₂-Emissionen leisten müssen. In erster Linie ist dies nur durch den Einsatz von Zementen möglich, bei denen der Klinkeranteil reduziert und der Anteil anderer Hauptbestandteile wie Hüttensand, Flugasche und Kalksteinmehl erhöht wird. Ziel der Arbeiten des Forschungsinstituts ist es, diese Zemente so zu optimieren, dass sie für alle Bereiche des Betonbaus ohne Einschränkungen eingesetzt werden können.

Einige Forschungsvorhaben beschäftigten sich nach wie vor mit der Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR). An einigen wenigen Betonfahrbahndecken waren nach 6- bis 10-jähriger Liegedauer Schäden aufgetreten, an denen eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion beteiligt war. Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen konnte der VDZ Empfehlungen für den Alkaligehalt der Fahrbahndeckenzemente geben.

Ein weiterer Schwerpunkt der Forschung der Abteilung Betontechnik ist das Zusammenwirken von Zement und Zusatzmitteln. So werden Fließmittel der neuen Generation, Schwindreduzierer und Luftporenbildner untersucht.

Die Ergebnisse der wissenschaftlichen Arbeit wurden in Vorträgen und Berichten veröffentlicht und flossen unmittelbar in die Normungsarbeit ein, zu der die Mitarbeiter des Instituts, insbesondere bei der Abfassung und Einführung der neuen Normen auf dem Gebiet des Betons, einen wesentlichen Beitrag leisteten. Rechtzeitig bevor die Übergangsfrist von der alten zur neuen Normengeneration zu Ende ging und nur noch DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 für neue Bauwerke verwendet werden dürfen, wurde eine A1-Änderung zu DIN 1045-2 veröffentlicht. Ebenfalls zu nennen ist die Mitarbeit an der Abfassung einiger Richtlinien des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) sowie an Regelwerken der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV).



Portlandkompositzemente

Der Einsatz von Portlandkompositzementen erhöht die Ökoeffizienz der Betonbauweise, da diese Zemente im Vergleich zu Portlandzement einen geringeren Klinkergehalt aufweisen. Durch den Einsatz anderer Hauptbestandteile können insbesondere die CO₂-Emissionen bei der Zementherstellung gesenkt werden. Es zeigt sich, dass beispielsweise bei einer Abnahme des durchschnittlichen Klinkeranteils um 5 %, hochgerechnet auf den jährlichen Inlandsversand der deutschen Zementwerke von rund 30 Mio. t (Durchschnitt 1999-2003), die CO₂-Emissionen pro Jahr um mehr als 1 Mio. t reduziert werden. Dies setzt jedoch voraus, dass diese Zemente bezüglich ihrer baupraktischen Eigenschaften und ihrer Berücksichtigung im Regelwerk mit Portlandzementen weitgehend vergleichbar sind.

Normative Voraussetzungen und baupraktische Anwendungsgebiete

Zur Abschätzung zukünftiger Potentiale für neue Zemente hilft ein Blick auf die Versandanteile von Zementen in Deutschland nach baupraktischen Anwendungsgebieten. **Tafel V-1** gibt einen ungefähren Überblick für das Jahr 2000. Unterschieden wird nach den Kategorien üblicher Hochbau, Ingenieur- und Tiefbau, Verkehrsflächen sowie sonstige Anwendungen. Die Übersicht macht deutlich, dass rund 50 % der in Deutschland produzierten Zemente zur Herstellung von Transportbeton für Innen- und Außenbauteile des üblichen Hochbaus, d. h. im Wohnungsbau und im gewerblichen Hochbau eingesetzt werden. 14 % des Zementversands werden zur Herstellung von Fertigteilen für den Hochbau verwendet. Der im Ingenieur- und Tiefbau verwendete Anteil der in Deutschland versandten Zemente beträgt rund 10 %, während rund 19 % der Zemente zur Herstellung von Betonprodukten für Verkehrsflächen sowie für den Betonstraßenbau eingesetzt werden. Die verbleibenden 8 % Versandanteil kommen in unbewehrtem Beton zum Einsatz.

Die bisher in Deutschland produzierten Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen der Festigkeitsklasse 32,5 erfüllen alle wesentlichen Anforderungen zur Herstellung von Ortbeton – sei es als Transportbeton oder als Baustellenbeton – für den üblichen Hochbau. Diese Zemente weisen ein für praxisübliche Herstellverfahren ausreichend schnelles Festigkeitsbildungsvermögen auf. Die mit diesen Zementen hergestellten Betone verfügen über einen

Tafel V-1: Anwendungsgebiete und Versandanteile des Inlandsversands von Zementen in Deutschland in %

Anwendungsgebiet	Bauwerke	Zementfestigkeitsklasse	Zementart	Ortbeton	Werksbeton
Diverse Anwendungen	Unbewehrter Beton	32,5 N/R	CEM I CEM II CEM III CEM IV CEM V	8	-
Üblicher Hochbau (einschließlich Mörtel und Estrich) Wohnungsbau Gewerblicher Hochbau	Innenbauteile (frostgeschützt)	32,5 N/R 42,5 N/R	CEM I CEM II CEM III	47	14
	Außenbauteile				
Ingenieurbau, Tiefbau	Brücken, Tunnel, Wasser- und Meeresbauwerke, Rohre	52,5 N/R	CEM I	9	3
		42,5 N/R	CEM II		
		32,5 N/R	CEM III		
Verkehrsflächen	Pflastersteine, Gehwegplatten	52,5 N/R	CEM I	-	16
		42,5 N/R	CEM II CEM III		
	Straßen, Flugplatzflächen, Feste Fahrbahn	32,5 R	CEM I CEM II CEM III	3	-

ausreichenden Schutz gegen carbonatisierungs- und chloridinduzierte Korrosion von Stahl im Beton. Darüber hinaus verfügen sie über einen unter den mitteleuropäischen Klimabedingungen ausreichenden Frostwiderstand. Ortbeton für Ingenieurbauwerke wie Brücken oder Tunnel wird in der Regel mit Zementen höherer Festigkeitsklassen und damit heute meistens mit Portlandzement CEM I hergestellt. Aber auch in diesem Bereich können CEM II- und CEM III-Zemente eingesetzt werden und weisen zunehmende Marktanteile auf. Der Bereich des üblichen Hochbaus einschließlich des Wohnungsbaus und des gewerblichen Hochbaus bildet damit ein wesentliches Marktsegment. Erfüllen neue Zemente die Anforderungen für diese Anwendungsgebiete, können große Teile des Marktes für diese Zemente erschlossen werden.

Allgemein sind zur Herstellung von Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 alle Zemente nach DIN EN 197-1 und DIN 1164 geeignet. Im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit der mit diesen Zementen hergestellten Betone müssen jedoch je nach Anwendungsbereich zementartabhängige Unterschiede beachtet werden. Hierzu sind in den Betonnormen je nach Expositionsklasse, denen ein Bauteil zuzuordnen ist, unterschiedliche Anwendungsregeln festgelegt. Einschränkungen in der Verwendbarkeit bestehen dabei z. B. auch für eine Reihe bisher in Deutschland nicht angewandeter CEM II-Zemente, wie z. B.

Portlandkalksteinzemente mit Kalksteingehalten bis 35 M.-% (CEM II/B-LL) sowie Portlandkompositzemente mit bis zu 35 M.-% Hüttensand und Kalkstein (CEM II/B-M (S-LL)). Die Einschränkungen betreffen besonders die Verwendung für frostbeanspruchte sowie chloridbeaufschlagte Bauteile (Expositionsklassen XS, XD, XF). Sollen solche Zemente in Bereichen eingesetzt werden, für die die Betonnorm keine Anwendung zulässt, so ist eine allgemeine bauaufsichtliche Anwendungszulassung erforderlich. Dieses gilt für neue CEM II-M-Zemente, die von einigen deutschen Zementherstellern entwickelt werden. Erste bauaufsichtliche Zulassungen für die Verwendung solcher CEM II-M-Zemente wurden im vergangenen Jahr erteilt. Mit zunehmender Praxisbewährung dieser Zemente, unterlegt durch die im Rahmen von Forschungsvorhaben geschaffene Datenbasis, kann die Notwendigkeit solcher Zulassungen entfallen, indem die Anwendungsregeln entsprechend geändert werden. Vor diesem Hintergrund wurden im Forschungsinstitut Untersuchungen durchgeführt, um eine erweiterte Datengrundlage für Betone unter Verwendung neuer Portlandkompositzemente zu erarbeiten. Hierbei wurden insbesondere dauerhaftigkeitsrelevante Parameter von Portlandkalksteinzementen mit Kalksteingehalten bis 35 M.-% (CEM II/B-LL) sowie von Portlandkompositzementen mit bis zu 35 M.-% Hüttensand und Kalkstein (CEM II/B-M (S-LL)) ermit-

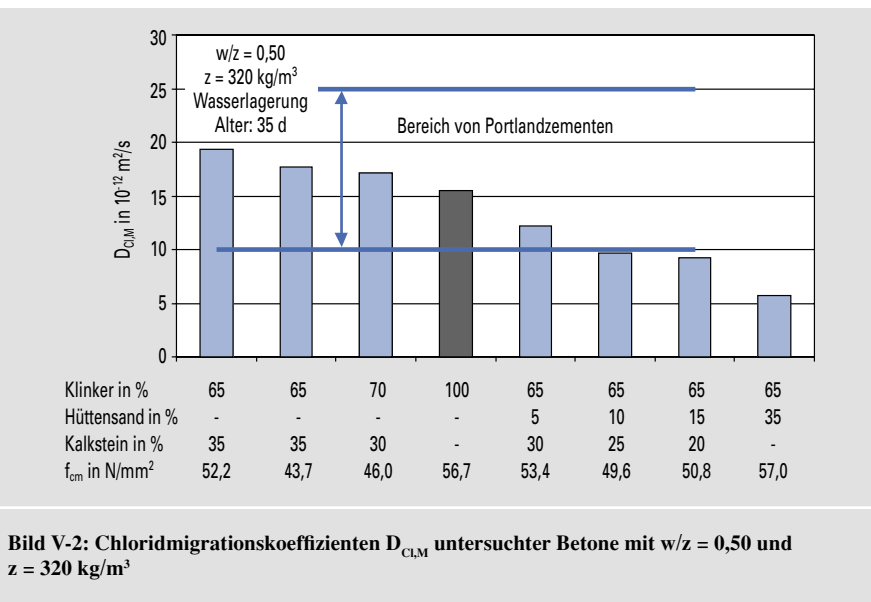
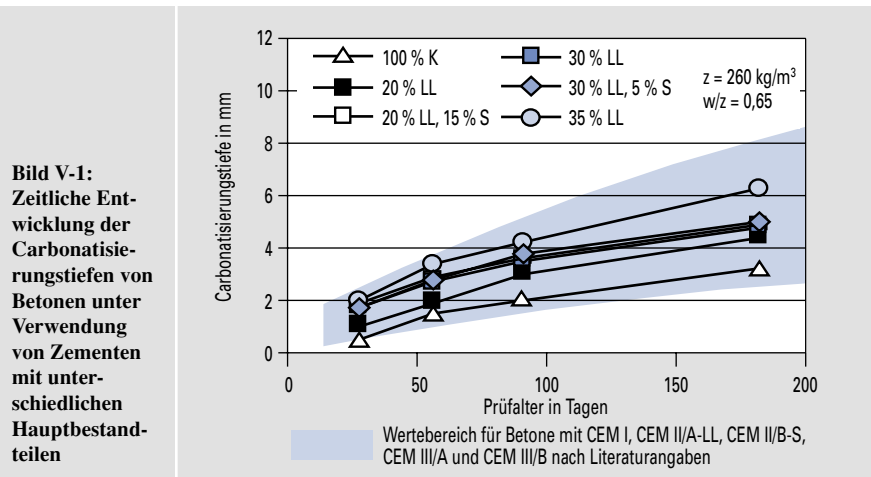
telt. Gegenstand weiterer Untersuchungen sind Portlandflugaschезemente mit bis zu 35 M.-% kieselsäurereicher Flugasche sowie Portlandkompositzemente CEM II-M (V-LL) und CEM II-M (S-V) unterschiedlicher Zusammensetzung.

Dauerhaftigkeit von Betonen mit Portlandkompositzementen

Vergleichende Dauerhaftigkeitsuntersuchungen an Betonen setzen voraus, dass Betone ein vergleichbares Festigkeitsniveau als Kennwert für eine ähnliche Gefügeausbildung zum Zeitpunkt der Prüfung – in der Regel nach 28 Tagen – aufweisen. Von daher sollten die Portlandkompositzemente eine vergleichbare 28-Tage-Druckfestigkeit aufweisen, die im praxisrelevanten Bereich deutscher Zemente der Festigkeitsklasse 32,5 R zwischen 44 und 48 MPa liegt. Die Zementhauptbestandteile Portlandzementklinker, Hüttensand und Kalkstein mussten daher in ihrer Feinheit so variiert werden, dass bei unterschiedlicher Zusammensetzung der Zemente das angegebene Festigkeitsniveau in etwa erreicht wurde. Für diese Zemente wurden das Festigkeitsbildungspotential, die Porosität und die Porengrößenverteilung, die Carbonatisierung, der Widerstand gegen eindringende Chloride sowie der Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von mit ihnen hergestellten Mörteln und Betonen untersucht. Die Zusammensetzung der Mörtel und Betone orientierte sich an den Grenzwerten für die Zusammensetzung von Beton entsprechend den Expositionsklassen in DIN 1045-2.

Carbonatisierung

Die zeitliche Entwicklung der Carbonatisierungstiefen einiger untersuchter Betone der Zusammensetzung für die Expositionsklasse XC3 ist in Bild V-1 dargestellt. Gleichzeitig wurde in das Bild der Wertebereich eingetragen, der nach Literaturangaben für die Zemente CEM I bis CEM III/B unter den hier vorliegenden Prüfbedingungen anzunehmen ist. Diese Zemente dürfen in allen Expositionsklassen für carbonatisierungsinduzierte Bewehrungskorrosion verwendet werden. Aus der Darstellung wird ersichtlich, dass die hier ermittelten Carbonatisierungstiefen für Betone unter Verwendung von Zementen mit bis zu 35 M.-% Kalkstein im o. g. Bereich lagen, obwohl der Zement mit 35 % Kalkstein eine verhältnismäßig geringe 28-Tage-Normdruckfestigkeit von 40 MPa aufwies. Gleiches galt für die Carbonatisierungstiefen von Betonen unter Verwendung von Portlandkompositzementen mit bis zu 35 M.-% Hüttensand und Kalkstein. Die Porosität von Mörteln mit



Portlandkalksteinzementen nimmt mit dem Gehalt an Kalksteinmehl geringfügig zu. Die Erhöhung der Carbonatisierungstiefen der Betone mit kalksteinhaltigen Zementen korrelierte mit der Zunahme des Porenanteils > 0,1 µm entsprechender Mörtel im Alter von 28 Tagen.

Widerstand gegenüber dem Eindringen von Chloriden

Durch den Einsatz von bis zu 25 M.-% Kalkstein wird nach Literaturangaben der Widerstand gegenüber dem Eindringen von Chloriden nicht wesentlich beeinträchtigt. Für Betone mit Portlandkalksteinzement und Kalksteingehalten > 25 M.-% konnte vermutet werden, dass sich der Widerstand gegenüber dem Eindringen von Chloriden im Vergleich zu Betonen mit Portlandzement leicht verringern würde. Dies bestätigen die hier erzielten Ergebnisse. Bild V-2 zeigt die an Beton mit einem Wasserzementwert $w/z = 0,50$ und einem Zementgehalt $z = 320 \text{ kg/m}^3$ im Alter von

35 Tagen ermittelten Chloridmigrationskoeffizienten bei Verwendung verschiedener Laborzemente. Gleichzeitig wurde jedoch festgestellt, dass bei Verwendung von Portlandkalksteinzementen mit bis zu 35 M.-% Kalkstein die ermittelten Werte für den Chloridmigrationskoeffizienten in dem in der Literatur angegebenen, üblichen Wertebereich für Portland- und Portland-HS-Zemente lagen (D_{CLM} zwischen rd. 10 und $25 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$). In Betonen mit hüttensandhaltigen Zementen wird der Kapillarporenraum, der maßgeblich für wesentliche Transportprozesse verantwortlich ist, zugunsten des im Wesentlichen nicht transportrelevanten Gelporenraums verringert. Die Chloridmigrationskoeffizienten bei Verwendung der Portlandkompositzemente mit bis zu 35 M.-% Hüttensand und Kalkstein liegen daher unterhalb des Koeffizienten des geprüften Portlandzements und oberhalb des Portlandhüttenzements mit 35 M.-% Hüttensand.

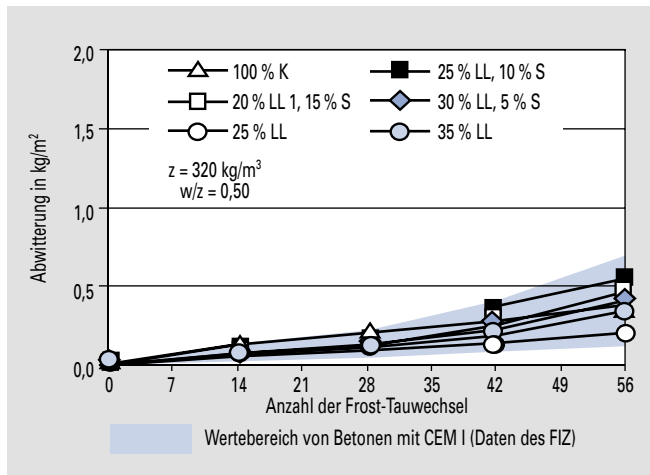


Bild V-3: Abwitterungen von Betonen unter Verwendung von Portlandzement und verschiedenen Portlandkompositzementen – CF-Test

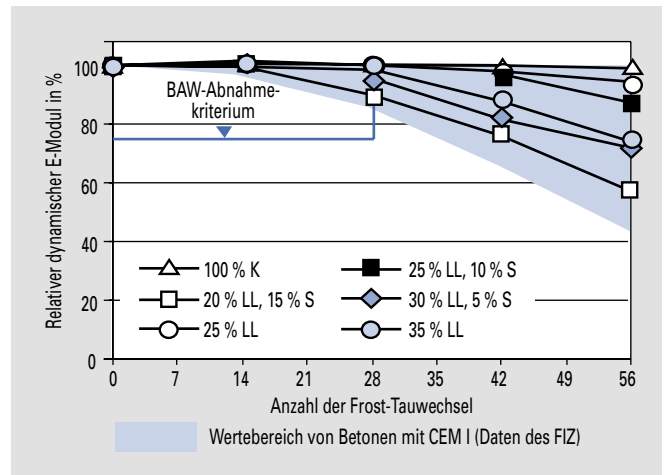


Bild V-4: Relativer dynamischer E-Modul von Betonen mit $z = 320 \text{ kg/m}^3$ und $w/z = 0,50$ unter Verwendung von Portlandzement und verschiedenen Portlandkompositzementen – CIF-Test (Abnahmekriterium der Bundesanstalt für Wasserbau: 75 % nach 28 Frost-Tauwechseln)

Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand

Bei Schäden infolge eines Frostangriffs wird zwischen äußerer und innerer Schädigung unterschieden. Äußere Schäden zeigen sich in Form von Oberflächenabwitterungen. Innere Gefügeschädigungen können z. B. mit Hilfe der Messung der Ultraschalllaufzeit und dem hieraus abgeleiteten dynamischen E-Modul festgestellt werden (siehe auch Abschnitt „Dauerhaftigkeit“). Welche Bedeutung ein Abfall des dynamischen E-Moduls im Hinblick auf die zu erwartenden Eigenschaften des Betons nach einer Frostbeanspruchung hat, wurde bislang jedoch weder für Laborbetone noch im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit der Betone in der Praxis geklärt. Er wurde im Rahmen der Untersuchungen mit neuen Zementen zwecks Erfahrungssammlung und zum Vergleich mit Literaturdaten sowie mit an verschiedenen Stellen diskutierten Abnahmekriterien ebenfalls bestimmt.

In den durchgeführten Versuchen zeigten Betone mit einem Wasser/Zement-Wert $w/z = 0,50$ und einem Zementgehalt $z = 320 \text{ kg/m}^3$ unter Verwendung der im Labor hergestellten Portlandkalksteinzemente mit bis zu 35 % Kalkstein auch bei hoher Wassersättigung im CF-Test keine signifikant höheren Abwitterungen als Beton mit Portlandzement. Ein systematischer Einfluss des Kalksteingehalts war nicht erkennbar. Dies traf ebenfalls auf die Abwitterungen der Betone zu, die aus Portlandkompositzementen mit bis zu

35 M.-% Hüttensand und Kalkstein hergestellt wurden (Bild V-3). Die im CIF-Verfahren ermittelten relativen dynamischen E-Moduln dieser Betone zeigt Bild V-4. Hier ist die Differenzierung im Hinblick auf den Kalksteingehalt deutlicher ausgeprägt als bei den Abwitterungen. Bei Prüfung von Betonen mit dem CIF-Verfahren werden verschiedene Abnahmekriterien genannt, die hier nicht weiter diskutiert werden sollen. Das im Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ der Bundesanstalt für Wasserbau festgelegte Abnahmekriterium von 75 % nach 28 Frost-Tauwechseln wurde von allen Betonen mit deutlichem Abstand eingehalten. Die relativen dynamischen E-Moduln der Betone mit Portlandkompositzementen lagen insgesamt im Bereich der Werte von Betonen mit Portlandzementen. Im Würfelverfahren trat bei denselben Betonen unabhängig vom verwendeten Zement nach bis zu 100 Frost-Tauwechseln praktisch keine Änderung des relativen dynamischen E-Moduls auf. Die kritische Sättigung wurde also in dieser Prüfung auch nach 100 Frost-Tauwechseln nicht erreicht.

Den Einfluss unterschiedlicher Portlandkompositzemente auf den Frost-Tausalz-Widerstand des Betons zeigt Bild V-5. Die Betone mit Portlandkompositzementen zeigten kein signifikant unterschiedliches Abwitterungsverhalten im Vergleich zum Beton mit Portlandzement. Die Abwitterungen aller Betone lagen nach 28 Frost-Tauwechseln deutlich unter dem bei dieser Prüfung im Allgemeinen als Abnahmekriterium verwendeten Wert von $1,5 \text{ kg/m}^2$.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Auch in Deutschland bisher nicht eingesetzte Portlandkompositzemente mit Hüttensand und Kalkstein (CEM II/B-M (S-LL)) können nach den durchgeführten Untersuchungen in Betonen für alle Expositionsclassen bezüglich carbonatisierungs- und chloridinduzierter Bewehrungskorrosion sowie Frostangriff mit und ohne Taumittel eingesetzt werden. Zur Absicherung der Untersuchungsergebnisse zum Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Betonen unter Verwendung von Portlandkalksteinzementen CEM II/B-LL werden im Forschungsinstitut ergänzende Untersuchungen mit Kalksteinen durchgeführt, deren CaCO_3 -Gehalt zwischen 75 und 90 M.-% liegt.

Zement und Zusatzmittel

Der Einsatz von Betonzusatzmitteln zur Steuerung von Frisch- und Festbetoneigenschaften gehört heute zum Stand der Technik. Etwa 90 % der in Deutschland hergestellten Betone enthalten Betonzusatzmittel. Insgesamt stehen in Deutschland derzeit mehr als 550 Betonzusatzmittel zur Verfügung, die 14 unterschiedlichen Wirkungsgruppen zugeordnet sind. Den Schwerpunkt bilden hierbei die Betonverflüssiger und Fließmittel mit einem Anteil von rd. 70 %.

Der Einfluss von Betonzusatzmitteln auf die Hydratation von Zement wird meist empirisch bestimmt und kontrovers diskutiert. Über die genauen Wirkungsmecha-

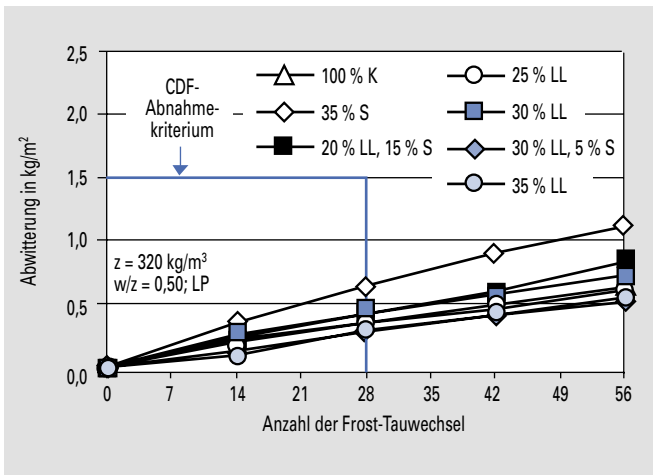


Bild V-5: Abwitterungen von Betonen unter Verwendung von Portlandzement und verschiedenen Portlandkompositzementen – CDF-Test (Abnahmekriterium: 1,5 kg/m² nach 28 Frost-Tauwechseln)

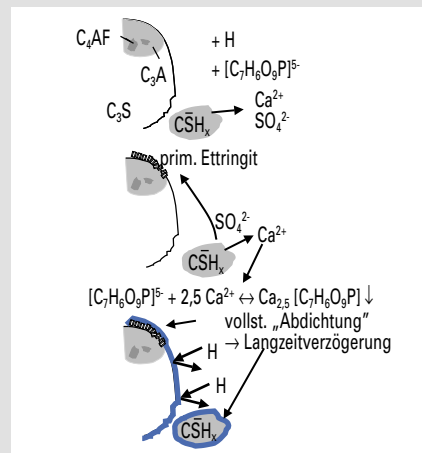


Bild V-6: Einfluss von LVZ auf die Hydratation von sulfatoptimiertem Portlandzement

nismen einiger Zusatzmittel fehlen wissenschaftlich begründete Kenntnisse noch weitgehend. Das gilt insbesondere für Langzeitverzögerer, Schwindreduzierer, Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatethern sowie für neuartige Luftporen bildende Betonzusatzmittel, deren Wirkung umfangreiche Untersuchungen gewidmet waren.

Langzeitverzögerer (LVZ)

LVZ sind organische Verzögerer, die aufgrund ihrer Zusammensetzung die Hydratation von Zement sehr stark, ggf. über mehrere Tage, blockieren können. Neben dem Einsatz für das Recycling von Frischbeton werden LVZ für die Verzögerung von Spritzbeton bei langen Förderwegen und bei Massenbeton verwendet. In Deutschland als Recyclinghilfen zugelassene LVZ enthalten hauptsächlich 2-Phosphonobutan-1,2,4-tricarbonsäure (PBTC).

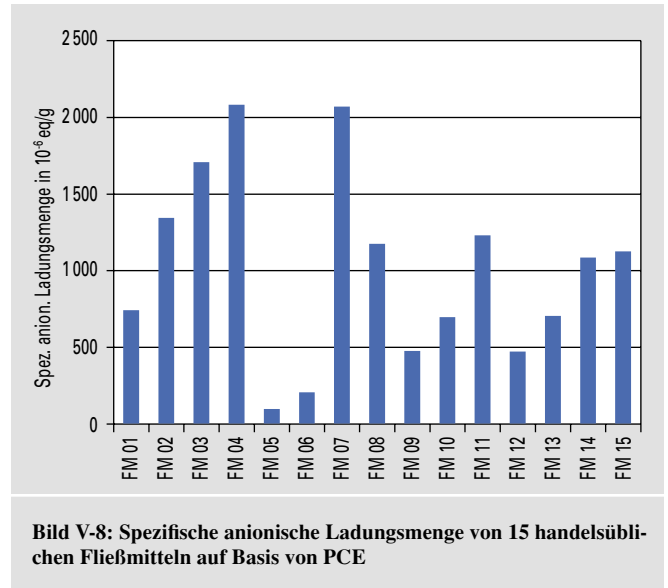
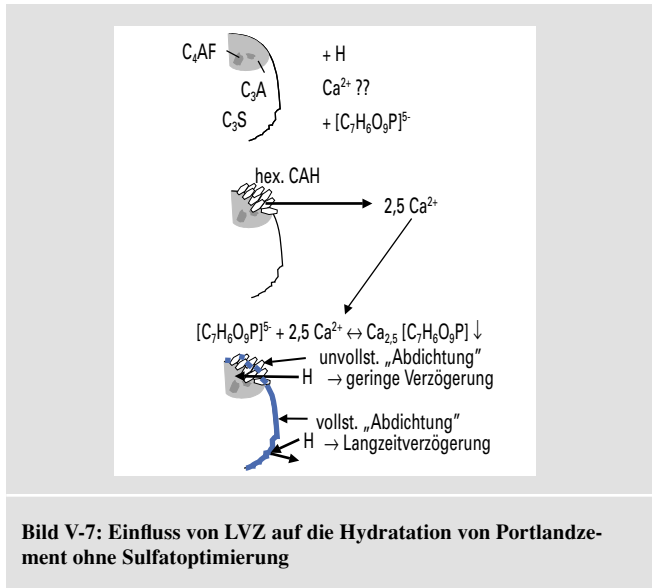
In einem von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V. (AiF) und der Dyckerhoff-Stiftung geförderten Forschungsvorhaben wurden die Auswirkungen von LVZ auf die Hydratation reiner Klinkerphasen, Klinker und Portlandzemente systematisch untersucht. Untersuchungen an reinen Klinkerphasen haben gezeigt, dass die Langzeitverzögerung im Wesentlichen auf einer Blockierung der Hydratation der Calciumsilicate beruht. Die Hydratation von C₃S wurde durch LVZ bis zu 180 Tage nahezu vollständig verhindert. Bei reinem C₃A wurde durch Zugabe von LVZ der Phasenumsatz erhöht, bei reinem C₄AF wurde er verringert. Bei Gemischen aus C₃A und Sulfat-

trägern wurde durch LVZ die Bildung von primärem Ettringit kurzzeitig beschleunigt. Der weitere Hydratationsfortschritt von C₃A bzw. C₄AF sowie die Reaktion von Halbhydrat mit Wasser zu Gips wurden stark verzögert. Enthielten die Gemische aus C₃A und Sulfatträger zusätzlich Calciumhydroxid, wurden mit Ausnahme der Bildung von primärem Ettringit alle weiteren Hydratationsreaktionen blockiert.

Die Ergebnisse der Untersuchungen an reinen Klinkerphasen haben sich bei den Untersuchungen an Portlandzementen bestätigt. Bei sulfatoptimierten Portlandzementen konnte die Hydratation der Calciumaluminat- und -silicate stets planmäßig langzeitverzögert werden. Bei zu geringem Angebot an Calciumsulfat wurde durch Zugabe von LVZ die Hydratation des C₃A stark beschleunigt, was ein besonders schnelles Ansteifen und Erstarren zur Folge hatte. Die weitere Festigkeitsentwicklung wurde jedoch stark gehemmt, da gleichzeitig die reaktionsträgeren Calciumsilicate verzögert wurden. Die aus den Versuchsergebnissen abgeleiteten Wirkungsmechanismen des LVZ bei Zugabe zu einem Portlandzement zeigt Bild V-6. Darin ist der Querschnitt eines Klinkerpartikels und der von Sulfatträgern (CSH_x) schematisch dargestellt. Im alkalischen Milieu der Porenlösung spaltet die PBTC fünf Protonen ab und liegt vollständig dissoziiert vor ([C₇H₁₁O₉P]⁵⁻). Aufgrund der durch die Sulfatträger bereitgestellten Calcium- und Sulfat-Ionen bildet sich auf der Oberfläche der Calciumaluminat eine dünne Schicht aus primärem Ettringit, was

die weitere C₃A-Hydratation bremst. Daneben liefert der Sulfatträger ausreichend Calcium-Ionen für die sofortige Bildung von schwer löslichem Calciumphosphonat (Ca_{2,5}[C₇H₆O₉P]). Das Calciumphosphonat „dichtet“ sowohl die Oberflächen des Klinkerpartikels als auch die der noch ungelösten Sulfatträger ab. Der weitere Zutritt von Wasser (H) bzw. der weitere Ionenaustausch wird stark behindert und die Hydratation planmäßig langzeitverzögert.

Bei Portlandzementen mit fehlendem oder zu geringem Angebot an Sulfatträger (Bild V-7) liegen nur geringe Mengen an gelöstem Calcium vor. Bedingt durch den Calciumanspruch der PBTC kommt es in diesen Fällen zu einer kurzzeitig beschleunigten Hydratation reaktiver Klinkerphasen wie z. B. C₃A. Die dabei verstärkt gebildeten hexagonalen Calciumaluminat-hydrate (CAH) führen meist zu einem deutlichen Ansteifen oder Erstarren. Die während dieser kurzen Beschleunigungsphase freigesetzten Calcium-Ionen werden durch PBTC gebunden. Das dabei entstehende schwer lösliche Calciumphosphonat belegt die Oberflächen der einzelnen Klinkerpartikel unterschiedlich. Auf den Oberflächen relativ reaktionsträger Klinkerphasen, wie z. B. C₃S und C₂S, die bei Entstehung der schwer löslichen Verbindung noch weitgehend frei von Hydratationsprodukten sind, kann eine weitgehend geschlossene Belegung durch Calciumphosphonat erfolgen. Oberflächen, die zum Teil schon mit Hydratationsprodukten belegt sind, z. B. die des C₃A, weisen eine relativ große spezifische Oberfläche auf. Die Menge



an gebildetem Calciumphosphonat reicht in der Regel nicht aus, um diese Bereiche vollständig „abzudichten“. Der Wasserzutritt und Ionenaustausch kann nicht vollständig blockiert werden, so dass die Hydratation dieser Phasen nur gering verzögert wird.

Es hat sich gezeigt, dass die Sulfatoptimierung der Zemente durch LVZ nicht ersetzt werden kann, sondern dass die durch Calciumsulfat initiierte Bildung von primärem Ettringit sowie die Bereitstellung von Calcium-Ionen wesentliche Voraussetzungen für eine planmäßige Wirkungsweise des LVZ sind. Deshalb eignen sich z.B. sulfatfreie Zemente nicht für eine gezielte Langzeitverzögerung.

Fließmittel

Die Herstellung von Fließbeton sowie von hochfestem Beton erfordert den Einsatz von Fließmitteln. Eine Weiterentwicklung auf dem Gebiet der Fließmittelwirkstoffe stellen synthetische organische Polymere mit Carboxylsäuregruppen, z. B. Polycarboxylatether (PCE), dar. PCE bestehen aus Hauptkettenmolekülen, z. B. Polyacrylsäure, und Seitenkettenmolekülen, z. B. Polyethylenoxid, die an die Hauptkette gebunden sind. Über die negativ geladene Hauptkette lagern sich die PCE an positiv geladene Oberflächen des Zements und anderer feiner Feststoffpartikel an. Die dispergierende Wirkung ist im Wesentlichen auf die sterische, d. h. räumliche Abstoßung der Seitenketten zurückzuführen. Durch Variation des Längenverhältnisses von Hauptkette zu Seitenkette lassen sich unterschiedliche Eigenschaften wie eine starke Anfangsverflüssigung und/oder eine verlängerte Verarbeitungszeit von

Frischbeton, jeweils verbunden mit einer unveränderten oder verzögerten Zementehärtung, einstellen. Wie die Praxis zeigt, können diese Fließmittel empfindlicher gegenüber Temperaturschwankungen, unterschiedlichen Zementen oder Schwankungen in der Zementzusammensetzung reagieren als die klassischen Fließmittel auf Basis von Lignin-, Melamin- und Naphthalinsulfonat. Dies kann z. B. zu einer schnellen Konsistenzabnahme, zur Entmischung, zu intensivem Bluten oder zu einer starken Verzögerung der Festigkeitsentwicklung führen. Um solche Fehlreaktionen zu vermeiden, ist ein genaueres Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Fließmittel und Zement bzw. Beton erforderlich.

In einem von der AiF finanziell geförderten Forschungsvorhaben wird durch grundlagenorientierte Untersuchungen der Einfluss des chemischen Aufbaus der PCE-Moleküle und der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung handelsüblicher Zemente auf die Dispergierung und Festigkeitsentwicklung damit hergestellter Leime, Mörtel und Betone ermittelt. Systematisch werden die wesentlichen zusatzmittel- und zementseitigen Parameter erfasst, die zu unerwünschten Reaktionen, wie z. B. schnellem Verlust der Verarbeitbarkeit oder geringer Frühfestigkeit, führen können. Es soll ermittelt werden, welche Struktur bzw. Zusammensetzung „robuste“ PCE aufweisen müssen, um mit der Mehrzahl der handelsüblichen Zemente planmäßig zu einer möglichst effektiven Verflüssigung zu führen.

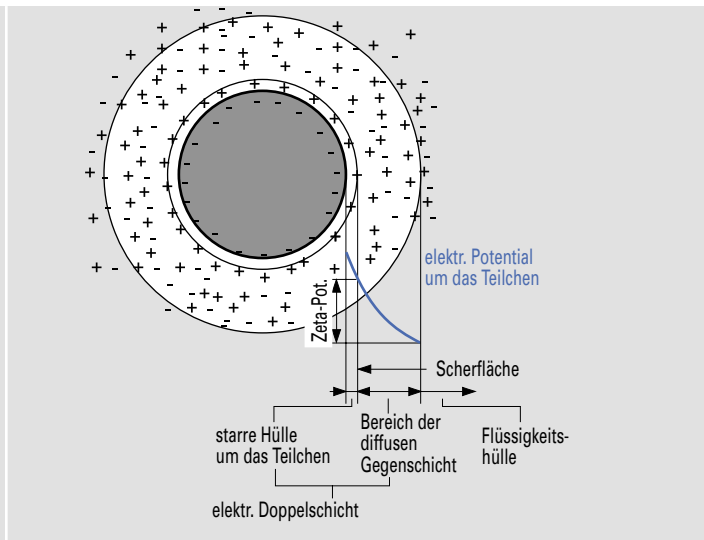
Im ersten Schwerpunkt der Untersuchungen wird eine Datenbasis über die genaue chemisch-mineralogische Zusammensetzung

ausgewählter handelsüblicher Zemente sowie über die Zusammensetzung und die molekulare Struktur handelsüblicher PCE erstellt. Neben unterschiedlichen PCE und Zementen werden hierbei auch die Schwankungsbreite verschiedener Lieferungen von Zementen und Fließmitteln analysiert. In die Datenbasis werden außerdem die Zusammensetzung der Porenlösung einiger Zementleime im frühen Alter einfließen. Im zweiten Schwerpunkt werden an Zement-PCE-Kombinationen, die unter Berücksichtigung der erarbeiteten Datenbasis ausgewählt werden, die Wechselwirkungen zwischen den handelsüblichen PCE und einzelnen Zementen systematisch untersucht. Es soll ermittelt werden, welche Zement- und Zusatzmittelparameter für eine optimale Wirksamkeit der PCE verantwortlich sind. Anhand gezielt synthetisierter PCE mit unterschiedlichen definierten Haupt- und Seitenkettenlängen soll der Einfluss des molekularen Aufbaus der PCE-Moleküle auf die Dispergierung, Wirksamkeitsdauer und Festigkeitsentwicklung von Leimen und Mörteln, die mit Modellzementen hergestellt wurden, untersucht werden. Dazu werden u. a. rheologische Kenngrößen, wie z. B. Fließgrenze und dynamische Viskosität, sowie das Zeta-Potential und die Zusammensetzung der Porenlösung ermittelt.

In einem ersten Schritt wurden 15 handelsübliche Fließmittel auf Basis von PCE hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung und physikalischen Kennwerte untersucht. Der molekulare Aufbau wurde über NMR-Spektroskopie (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy), bzw. GPC (Gel Permeation Chromatography) sowie über die Bestimmung der spezifischen an-

ionischen Ladungsmenge ermittelt. Erste Ergebnisse dieser Untersuchungen deuten darauf hin, dass einige der 15 Fließmittel nahezu identische PCE-Moleküle enthalten. Die spezifische Ladungsmenge beschreibt die tatsächliche wirksame Ladung der Hauptkette des PCE-Moleküls. Einen Überblick über die an den 15 Fließmitteln (FM) ermittelte spezifische anionische Ladungsmenge gibt Bild V-8. Die Ladungsmengen der PCE-Moleküle liegen je Gramm Polymer zwischen rd. 80 und 2070 Ladungsäquivalenten. Die Fließmittel mit sehr geringen Ladungsdichten werden vermutlich weitaus weniger stark an positiv geladene Zementoberflächen sorbiert als die Fließmittel mit einer hohen spezifischen anionischen Ladungsmenge.

Bild V-9:
Schematische Darstellung der elektrischen Doppelschicht und des Zeta-Potentials



Bestimmung des Zeta-Potentials

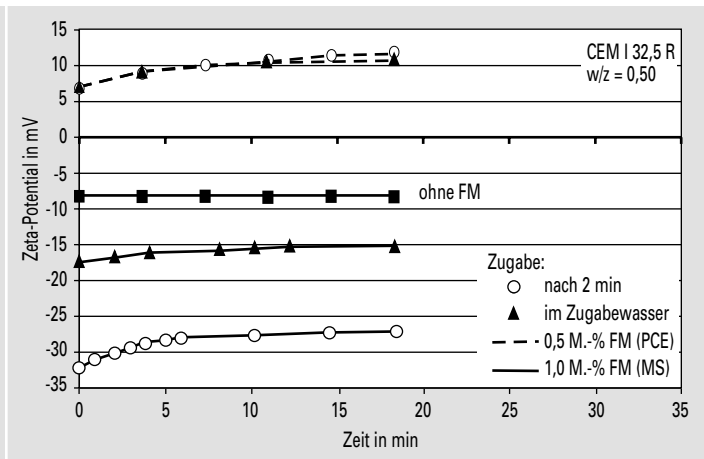
Die Sorption von Fließmittelmolekülen auf den Oberflächen der Zementpartikel wird mit der Messung des Zeta-Potentials untersucht. In Verbindung mit rheologischen Untersuchungen wird ermittelt, ob anhand des Zeta-Potentials Rückschlüsse auf die Anfangsverflüssigung und Verflüssigungsdauer von Fließmitteln gezogen werden können.

Bild V-10:
Sonde zur Bestimmung des Zeta-Potentials



Das Zeta-Potential ist ein elektrokinetisches Potential in der Grenzfläche zwischen dem bewegten und dem starren Teil der Doppelschicht, die sich an der Phasengrenze zwischen Festkörpern und wässrigen Lösungen bildet (Bild V-9). Das Potential gibt Hinweise über die Ladungsverhältnisse an der Partikeloberfläche. Bislang konnte das Zeta-Potential nur an stark verdünnten Zementsuspensionen ($w/z \sim 1000$) über die Bestimmung der electrophoretischen Mobilität, d.h. über die Teilchengeschwindigkeit in einem angelegten elektrischen Feld, ermittelt werden. Eine Übertragung der Ergebnisse auf Suspensionen mit praxisüblichen w/z -Werten ist, aufgrund des großen Einflusses u. a. des Feststoffgehalts und der Ionenstärke auf das Zeta-Potential, sehr stark fehlerbehaftet.

Bild V-11:
Einfluss von Fließmitteln auf das Zeta-Potential von Zementleim, $w/z = 0,50$



Seit September 2004 besteht im FIZ die Möglichkeit, über eine neue elektroakustische Messmethode das Zeta-Potential an sehr feststoffreichen Suspensionen ($w/z \geq 0,40$) zu bestimmen. Das Gerät besteht aus einer Sonde, die über ein Ultraschallfeld die Teilchen in der Suspension zu einer Relativbewegung anregt (Bild V-10). Die geladenen Teilchen bilden dadurch Dipole aus. Das erzeugte elektrische Feld wird als kolloidaler Vibrationsstrom gemessen und in das Zeta-Potential umgerechnet. Als Eingangsdaten werden die Dichten und Ultraschallgeschwindigkeiten der

festen und flüssigen Phase, die Partikelgrößenverteilung und die Konzentration benötigt. Parallel zum Zeta-Potential können die Temperatur, der pH-Wert und die Leitfähigkeit der jeweiligen Suspension ermittelt werden. Eine automatische Bürette ermöglicht z. B. die schrittweise Zugabe von Zusatzmitteln.

Bild V-11 zeigt beispielhaft den Einfluss von Fließmitteln auf Basis von Melaminsulfonat (MS) und Polycarboxylatether (PCE) auf das Zeta-Potential eines Zementleims. Während das anionische Fließmittel mit dem Wirkstoff Melaminsulfonat zu einer Verschiebung des Zeta-Potentials in negative Richtung führt, wird durch den PCE das Zeta-Potential in positive Rich-

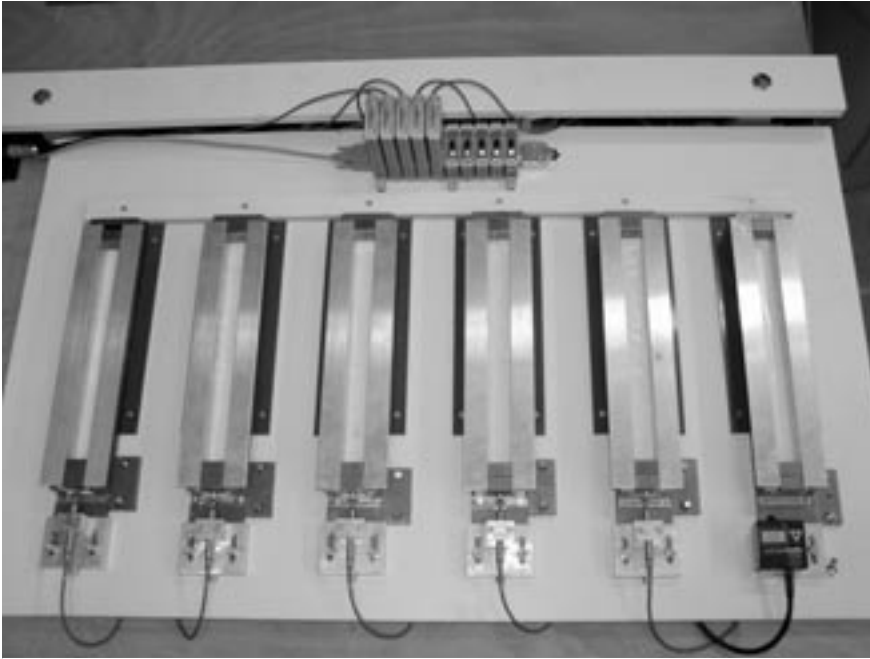


Bild V-12: Versuchseinrichtung zur kontinuierlichen Messung des autogenen Schwindens von Zementstein

tung verschoben. Weiterhin ist beim Melaminsulfonat ein deutlicher Einfluss des Zugabezeitpunkts zu erkennen. So stellt sich im Vergleich zur sofortigen Zugabe bei nachträglicher Zugabe ein deutlich niedrigeres Zeta-Potential ein.

Schwindreduzierende Zusatzmittel

Schwinden des Betons führt zu Verformungen, die bei Behinderung Spannungen im Betonbauteil hervorrufen können. Dadurch können Risse (Oberflächenrisse oder Trennrissen) entstehen, die die Dauerhaftigkeit beeinträchtigen. Infolge des Schwindens ist die Rissicherheit von großflächigen Bauteilen, wie beispielsweise Bodenplatten, sowie Bauteilen aus hochfestem Beton im frühen Alter gefährdet. Schwinden wird durch Feuchtegehaltsänderungen im Beton verursacht, welche durch umweltbedingte oder innere Austrocknung im Beton zu Veränderungen der inneren Kräfte im Gefüge der Zementsteinmatrix führen. Dabei entstehen Zugspannungen, die zum Zusammenziehen der Matrix führen. Dabei werden die Verformungen teilweise durch die Gesteinskörnung behindert.

Um das Schwinden von Beton zu reduzieren, wurden in Japan Anfang der 80er Jahre schwindreduzierende Zusatzmittel – Shrinkage Reducing Admixtures (SRA) – entwickelt, die seit ca. 1997 auch in Europa eingesetzt werden. Schwindreduzierer kommen in Deutschland bislang vermehrt im Estrichbau sowie bei Mörtelanwendungen zum Einsatz. Allerdings

werden sie in tragenden Bauteilen aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton derzeit nicht verwendet, da eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für diese Zusatzmittelart nicht vorliegt.

Bisher veröffentlichte Forschungsergebnisse zeigen, dass über die Wirkungsmechanismen und Auswirkungen von SRA widersprüchliche Aussagen vorliegen. Das gilt sowohl für Untersuchungen an Zementstein als auch an Mörtel und Beton. Es fehlen bislang aussagekräftige Untersuchungsergebnisse, welche die Auswirkungen dieser Zusatzmittel auf die Porenstruktur, die Materialkennwerte und das Langzeitverhalten sowohl von Zementstein als auch von Beton erklären. Im FIZ werden Untersuchungen über die Wirkungsmechanismen schwindreduzierender Zusatzmittel in einem von der AiF finanziell geförderten Forschungsvorhaben durchgeführt. Im Rahmen dieses Vorhabens sollen die prinzipiellen Wirkungsweisen der schwindreduzierenden Zusatzmittel im Zusammenwirken mit Zement geklärt werden. Auf der Basis dieser Ergebnisse kann das Potential der schwindreduzierenden Zusatzmittel abgeschätzt und zur Steigerung der Leistungsfähigkeit des Baustoffs Beton genutzt werden.

Schwindreduzierende Zusatzmittel sind wasserlösliche grenzflächenaktive Stoffe. Sie bestehen hauptsächlich aus höheren Alkoholen, welche die Oberflächenspannung des Wassers herabsetzen. Die

Herabsetzung der Oberflächenspannung wird in der Regel als Ursache für eine Abnahme des Schwindens genannt. Die Oberflächenspannung des Zugabewassers wird bei Zugabemengen zwischen 10 und 20 M.-% bezogen auf das Wasser um bis zu 63 % gesenkt. Höhere Dosierungen führen zu keiner weiteren Reduzierung der Oberflächenspannung der wässrigen Lösungen. Dieser Sättigungspunkt wird unter baupraktischen Bedingungen im Allgemeinen nicht erreicht. Die Anwendung schwindreduzierender Zusatzmittel führt zu einer Abminderung des Schwindens sowohl bei Normalbeton als auch bei hochfestem Beton. Die Reduzierung ist abhängig von w/z-Wert und Alter des Betons. Beim Einsatz von SRA wird von einer Schwindreduzierung bei Normalbeton um bis zu 50 % bei gleichzeitiger Abnahme sowohl der Druckfestigkeit als auch der Zugfestigkeit berichtet. Entscheidende Einflussgrößen stellen dabei die Dosiermenge sowie die chemische Zusammensetzung des Schwindreduzierers dar.

Ein wesentlicher Bestandteil der Untersuchungen im FIZ sind die Bestimmung der Gefüge- und Hydratationseigenschaften von mit SRA hergestellten Zementstein- und Mörtelproben. Darüber hinaus richtet sich besonderes Interesse auf die Erfassung sowohl des Anteils des autogenen Schwindens als auch des Trocknungsschwindens von Zementstein unter Einsatz verschiedenartiger Schwindreduzierer. Zur Bestimmung des autogenen Schwindens für niedrige w/z-Werte wurde eine Messeinrichtung entwickelt, die es ermöglicht, das hygrische Verformungsverhalten von konservierten, nahezu reibungsfrei gelagerten Zementsteinproben zu ermitteln (**Bild V-12**). Die Messungen erfolgen kontinuierlich und beginnen ca. 6 Stunden nach Wasserzugabe. Erste Ergebnisse zeigen, dass durch Einsatz von SRA mit Dosierungen von ca. 2 M.-% bezogen auf den Zement bei Zementsteinproben (w/z = 0,40) eine Reduzierung des Gesamtschwindens von bis zu 50 % erreicht werden kann.

Luftporenbildner

Zur Erzielung eines ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstands müssen dem Beton Luftporenbildner zugegeben werden, die im Frischbeton viele kleine, gleichmäßig verteilte Luftporen mit einem Durchmesser $\leq 300 \mu\text{m}$ erzeugen. Im erhärteten Beton dienen die Poren als Ausweichraum zum Abbau des beim Gefrieren der Porenflüssigkeit entstehenden Drucks. Fahrbahndeckenbeton, der im Winter stark mit Tausalz beaufschlagt wird, muss als Luftporenbeton (LP-Beton) hergestellt werden. Weitere

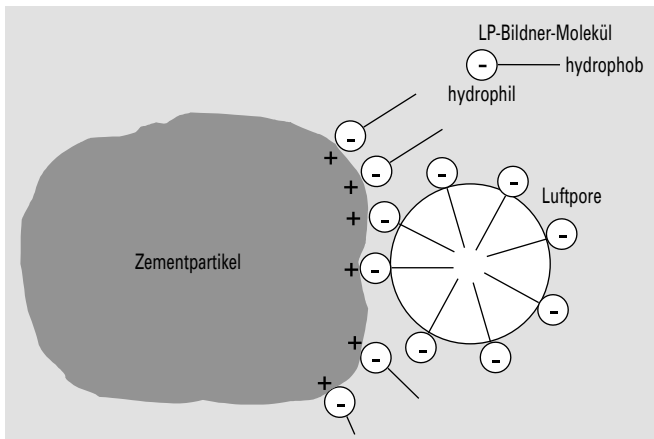


Bild V-13: Sorption der LP-Bildnermoleküle und Anheftung einer Luftpore an ein Zementpartikel

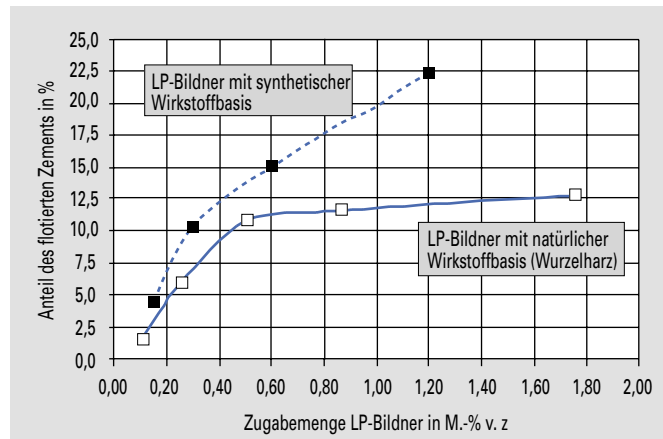


Bild V-14: Anteil des flotierten Zements in Abhängigkeit von der Zugabemenge und der Wirkstoffbasis zweier handelsüblicher Luftporenbildner

Anwendungsgebiete sind Brückenkappen und Räumlerlaufbahnen von Kläranlagen.

Luftporenbildner gehören zu den grenzflächenaktiven Substanzen, den so genannten Tensiden. Die gemeinsame Charakteristik der Tenside ist ihr hydrophob/hydrophiler Molekülaufbau. Sie bestehen aus einer unpolaren hydrophoben Kohlenwasserstoffkette und einer hydrophilen polaren Carboxyl-, Sulfat- oder Sulfonatgruppe. Als Grundstoffe für Luftporenbildner werden überwiegend Seifen aus natürlichen Harzen (Wurzelharze) und seit einigen Jahren zunehmend auch synthetische Wirkstoffe (z. B. Alkylpolyglykoether, Alkylsulfate oder -sulfonate) eingesetzt. Die Wirkstoffe werden einzeln oder auch in Kombination verwendet.

Ausgangspunkt der Untersuchungen im Forschungsinstitut war ein Schadensfall bei der Herstellung von Fahrbahndeckenbeton. Der Festbeton wies im Vergleich zum Frischbeton zum Teil stark erhöhte Luftporengehalte auf. Zur Aufklärung des Schadensfalls wurden im FIZ erste Untersuchungen an 6 handelsüblichen LP-Bildnern – 3 mit synthetischer und 3 mit natürlicher Wirkstoffbasis – durchgeführt. Die Versuchsergebnisse zeigten, dass eine wesentliche Erhöhung des Luftgehalts nur dann auftreten kann, wenn der LP-Bildner bei der Herstellung infolge einer zu kurzen Mischzeit überdosiert wurde, um den angestrebten Luftgehalt einzuhalten. Der Frischbeton enthält dann nicht ausreichend aufgeschlossenen und aktivierten LP-Bildner. Bei einem nachträglichen Eintrag von Mischenergie kann sich der Luftgehalt erhöhen. Ein systematischer Einfluss der Wirkstoffart (synthetisch bzw. natürlich) auf die Luftporenbildung konnte nicht nachgewiesen werden.

Da die genauen Wechselwirkungen zwischen Luftporenbildendem Wirkstoff, Mischzeit und Zugabemenge nicht hinreichend bekannt sind, ist zur Vermeidung von Fehlanwendungen ein hoher Prüfaufwand bei der Erstprüfung und während der Bauausführung erforderlich. In einem von der AiF geförderten Forschungsvorhaben werden daher die prinzipiellen Wirkungsweisen der Luftporenbildenden Wirkstoffe im Zusammenwirken mit Zement geklärt. Dabei werden zwei aufeinander aufbauende Schwerpunkte behandelt.

Zunächst wird eine Datenbasis für die in handelsüblichen Luftporenbildnern vorhandenen Wirkstoffe und ihrer Wirkstoffkonzentrationen geschaffen. Dabei werden die Daten zu den zurzeit verfügbaren LP-Bildnern anhand von Herstellerangaben und Literaturrecherchen zusammengetragen. Da diese Informationen häufig nicht zugänglich sind, wird zusätzlich in eigenen Untersuchungen die chemische Zusammensetzung der Zusatzmittel durch Infrarotspektroskopie bestimmt. Darüber hinaus werden pH-Wert, Dichte, Feststoffgehalt und Brechungsindex bestimmt. Anhand der so gewonnenen Datenbasis werden für die geplanten Untersuchungen im zweiten Schwerpunkt „Zementleim- und Mörteluntersuchungen“ wirkstoffbezogen unterschiedliche handelsübliche LP-Bildner ausgewählt. Da diese oft aus einem Gemisch verschiedener Stoffe bestehen, werden auch reine chemische Substanzen in die Untersuchungen einbezogen.

Insgesamt wurden 10 Substanzen (4 handelsübliche LP-Bildner und 6 Wirkstoffe) ausgewählt. An Zementleim wird das Sorptionsverhalten der Luftporenbildenden Substanzen (Sorption an Zement / Ausfällung der Wirkstoffe aus der Porenlösung /

Flotierbarkeit von Zement) und am Mörtel die Luftporenbildung in Abhängigkeit von Art und Zugabemenge des Wirkstoffs und der Mischzeit untersucht. In ergänzenden Versuchen soll auch die Kombination von Fließmittel und LP-Bildner erforscht werden.

Mit ersten Flotationsversuchen zur Kennzeichnung des Sorptionsverhaltens der LP-Bildner wurde begonnen. Während des Mischvorgangs des Betons lagern sich die LP-Bildnermoleküle um Luftblasen herum an bzw. werden mit der in der Regel negativ geladenen polaren Gruppe des Moleküls an positiv geladene Teilbereiche der Zementpartikel sorbiert (Bild V-13). Die Anheftung der Luftporen an Zementpartikel verbessert die Stabilität der Luftporen im Frischbeton. Im Flotationsversuch werden in einem Behälter Wasser, Zement und LP-Bildner gemischt und feine Luftblasen in die Suspension eingebracht. Wenn LP-Bildnermoleküle an Zementpartikel sorbiert werden, können sich Luftblasen anlagern und mit den Zementpartikeln an die Wasseroberfläche aufsteigen, wo der entstehende Schaum über einen konstanten Zeitraum abgeschöpft wird. Nach Trocknung des Schaums kann die Menge des flotierten Zements bestimmt werden. Bild V-14 zeigt beispielhaft erste Ergebnisse. Untersucht wurde je ein handelsüblicher LP-Bildner mit natürlicher und synthetischer Wirkstoffbasis mit unterschiedlichen Zugabemengen. Beim LP-Bildner mit synthetischer Wirkstoffbasis steigt die Menge des flotierten Zements mit Erhöhung der Zugabemenge stetig an, während beim LP-Bildner auf Wurzelharzbasis der Anteil des flotierten Zements ab einer bestimmten Zugabemenge nicht mehr anwächst. Auf welche Wechselwirkungen diese Unterschiede zurückzuführen sind, soll geklärt werden.

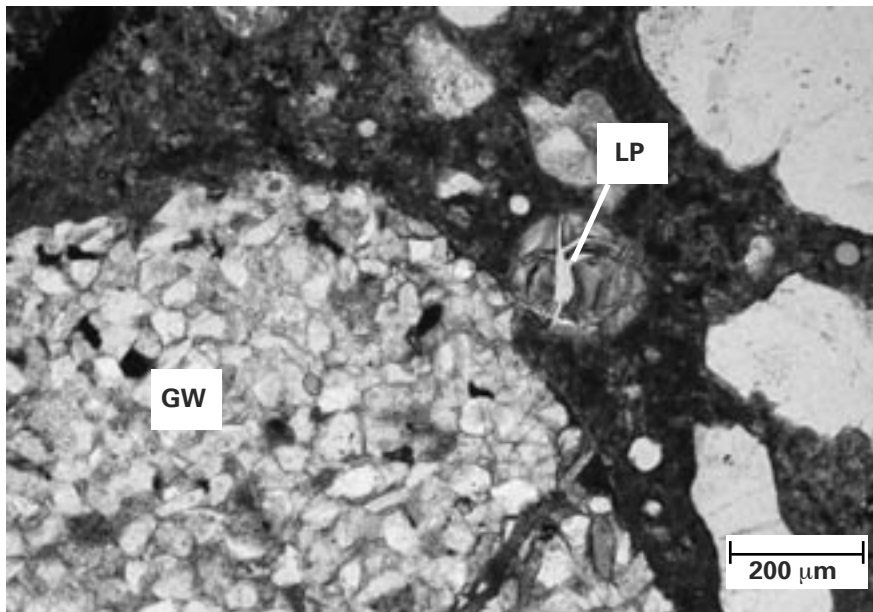


Bild V-15: Dünnschliff eines Betons mit gerissemen Grauwackekorn (GW) und gefüllter Luftpore (LP), Dünnschliff nach Lagerung des Betons in der 40-°C-Nebelkammer

Die Ursache liegt vermutlich darin begründet, dass sich in Abhängigkeit der chemischen Zusammensetzung des LP-Bildners der Anteil des in der Suspension gelösten Wirkstoffs ändert. Beim Luftporenbildner mit synthetischer Wirkstoffbasis verbleibt ein größerer Anteil der zugegebenen LP-Bildnermoleküle in Lösung. Hierdurch können mehr Luftblasen stabilisiert werden, die sich wiederum an Zementpartikel anheften können und damit den Anteil des flotierten Zements erhöhen.

Merkblatt Luftporenbeton

Die Untersuchungen des FIZ, aber auch eine Erweiterung der Palette der Betonausgangsstoffe (z. B. neue Zementarten, Zusatzmittel und -stoffe), die Anwendung neuer Misch- und Einbauverfahren und die Anpassung an neue Normen erforderten eine Überarbeitung des aus dem Jahr 1991 stammenden „Merkblatts für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton“. Die 2004 erschienene Neufassung des gleichnamigen Merkblatts enthält Hinweise für die Baupraxis, um die ziel-sichere Einstellung des Luftporensystems zu gewährleisten. Behandelt werden u. a. die Auswahl der Ausgangsstoffe, die Zusammensetzung, die Herstellung und Verarbeitung sowie die Nachbehandlung und Prüfung von LP-Beton. Um zukünftig eine nachträgliche, während der Bauausführung eintretende Erhöhung des Luftgehalts zu vermeiden, werden erweiterte Erstprüfungen mit erhöhten LP-Bildner-Zugabemengen und längeren Mischzeiten sowie bei einer Bauausführung im Sommer auch

einer erhöhten Frischbetontemperatur von 30 °C empfohlen.

Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Bei einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) reagieren alkaliempfindliche Bestandteile der Gesteinskörnung mit den Alkalien der Porenlösung im Beton zu einem Alkalisilicat, das bestrebt ist, Wasser aufzunehmen. Die damit verbundene Volumenvergrößerung führt zu Quelldrücken, die in Abhängigkeit von Art, Reaktivität, Menge und Korngrößenverteilung der alkaliempfindlichen Bestandteile, dem wirksamen Alkaligehalt in der Porenlösung sowie dem Feuchtigkeitsangebot das Betongefüge schädigen und die Dauerhaftigkeit des Betons herabsetzen können.

Die Untersuchungen des Forschungsinstituts der Zementindustrie hatten im Berichtszeitraum Maßnahmen zum Ziel, mit denen eine schädigende AKR vermindert werden kann. Hierzu wurde die Entwicklung von Prüfverfahren fortgesetzt, mit denen die Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen schnell beurteilt werden kann. Darüber hinaus wurden die Grundlagen zur Entwicklung weiterer NA-Zemente vertieft, indem insbesondere Porenlösungsanalysen durchgeführt wurden.

Betonfahrbahndecken

An einigen wenigen Betonfahrbahndecken traten 6 bis 12 Jahre nach der Herstellung Schäden in Form von Rissen auf. Der Beton der Fahrbahndecken wurde eingehend

im Forschungsinstitut der Zementindustrie untersucht. Um festzustellen, ob eine AKR an den Schäden beteiligt war, wurden Bohrkern aus geschädigten und nicht geschädigten Bereichen der Fahrbahndecken entnommen, in einer 40-°C-Nebelkammer gelagert und Dehnungsmessungen durchgeführt. Außerdem wurden Dünnschliffe der Betone hergestellt und unter dem Lichtmikroskop beurteilt (Bild V-15). Dabei zeigte sich, dass die Beteiligung einer AKR an einigen Schäden nicht ausgeschlossen werden kann. Insbesondere wurde deutlich, dass beim Lastfall „Straße“ (intensive Alkalizufuhr von außen und hohe dynamische Belastung) Gesteinskörnungen, die bisher nicht in der Alkali-Richtlinie des DAfStb genannt sind, zu Gefügestörungen infolge einer AKR führen können. Dazu gehören Grauwacken aus unterschiedlichen Gewinnungsgebieten (vgl. Bild V-15), Quarzporphyre und rezyklierte Gesteinskörnungen.

Vermeidung einer schädigenden AKR

Kann eine schädigende AKR nicht durch Verwendung von nicht reaktiven Gesteinskörnungen vermieden werden, muss die Alkalität der Porenlösung durch Verwendung von NA-Zementen oder puzzolanischen Zusatzstoffen reduziert werden. Die Wirkungsmechanismen von latent-hydraulischen und puzzolanischen Zementhauptbestandteilen bzw. Betonzusatzstoffen auf die Alkalität der Porenlösung wurden im FIZ eingehend untersucht (siehe Kap. III).

Das Quellvermögen der bei einer AKR entstehenden Alkalisilicate ist von deren chemischer Zusammensetzung abhängig. Natrium- und Kaliumsilicate sind bestrebt, Wasser aufzunehmen und entsprechend zu quellen. Bei Lithium geht man aufgrund verschiedener Beobachtungen davon aus, dass die damit gebildeten Silicate unter bestimmten Voraussetzungen im Beton nicht zum Quellen neigen.

Verwendung von Lithium

Die Wirkung von Lithium wurde im FIZ in einigen Tastversuchen untersucht, für die alkalireaktive Gesteinskörnungen aus deutschen Vorkommen verwendet wurden. Es wurden Betone mit norddeutschem Kies bzw. Kies-Edelsplitt des Oberrheins unter Verwendung von Lithiumnitrat und Lithiumhydroxid hergestellt. Aus der Literatur geht hervor, dass das molare Verhältnis zwischen Lithium und der Summe aus Kalium und Natrium im Beton bei Einsatz sehr reaktiver Gesteinskörnung 0,8 (Lithiumnitrat) bzw. 1,0 (Lithiumhydro-

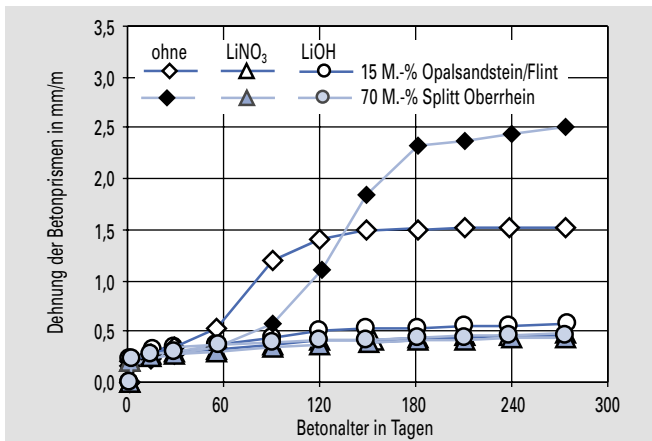


Bild V-16: Auswirkung von Lithiumnitrat ($[Li/(Na+K)]_{\text{molar}} = 0,8$) und Lithiumhydroxid ($[Li/(Na+K)]_{\text{molar}} = 1,0$) auf die Dehnung von Betonbalken (10 x 10 x 50 cm) mit 500 kg/m³ CEM I 32,5 R (1,3 M.-% Na₂O_{eq}) und w/z = 0,55

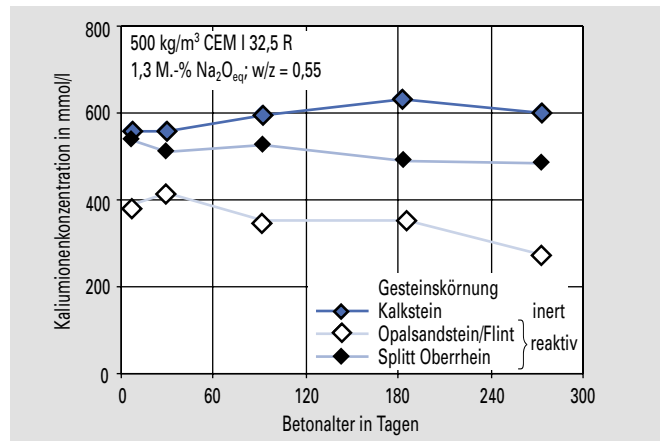


Bild V-17: Einfluss der Gesteinskörnung auf die Kaliumionenkonzentration der Porenlösung bei konservierter Lagerung in der 40°C-Nebelkammer

xid) sein sollte. Die Dosierung ist somit direkt abhängig vom Alkaligehalt des verwendeten Portlandzements und vom Zementgehalt des Betons. Bei den Untersuchungen wurde ein Portlandzement mit einem Na₂O_{eq} von 1,3 M.-% (Prüfzement) verwendet und der Beton mit 500 kg/m³ Zement hergestellt.

Anhand der Dehnung sowie des dynamischen E-Moduls von Balken mit den Abmessungen 10 x 10 x 50 cm sowie der Rissbildung an einem 30-cm-Würfel wurde das phänomenologische Verhalten der Betone verfolgt. Die Verwendung von Lithiumverbindungen führte bei den in der 40°C-Nebelkammer gelagerten Betonbalken im Vergleich zum Beton ohne Zusatzmittel zu einer deutlichen Verringerung der Dehnung (Bild V-16). Gleichzeitig wiesen die Betonwürfel bei Einsatz von Lithium keine Risse auf. Die positive Wirkung von Lithiumverbindungen wurde damit für diese Lagerung bestätigt. Inwiefern dies auch für reale Umgebungsbedingungen gilt, wird anhand langfristiger Untersuchungen an Probekörpern auf dem Dach des Institutsgebäudes in Düsseldorf beobachtet.

Einfluss von Lithium auf die Porenlösung

Um die Wirkungsweise von Lithiumverbindungen zu untersuchen, wurden Porenlösungen aus Betonen mit Lithium ausgepresst und ihre Lithium-, Kalium- und Natriumkonzentration bestimmt. Der Vergleich mit den insgesamt durch Zement und Zusatzmittel in den Beton eingetragenen Mengen an Alkalien zeigt, dass Lithium deutlich besser an die Hydratations-

produkte oder an die Alkalikieselsäuregele gebunden wird als Natrium oder Kalium. Allerdings sind weitere Grundlagenuntersuchungen erforderlich, um den genauen Wirkungsmechanismus des Lithiums zu klären. Lithiumverbindungen werden zzt. in Deutschland aufgrund des hohen Preises nicht angewendet.

Auswirkung der AKR auf die Alkalität der Porenlösung

Bisher war nicht hinreichend bekannt, zu welchem Zeitpunkt nach der Betonherstellung eine AKR einsetzt und wie viele Alkalien aus der Porenlösung für die Reaktion verbraucht werden. Es wurde deshalb zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Alkaligehalt der Porenlösung von Betonen mit unterschiedlichen Gesteinskörnungen (Kalkstein, norddeutscher Kies mit Opalsandstein und Flint, Kies-Edelsplitt des Oberrheins) bestimmt. Bild V-17 verdeutlicht, dass die Kaliumionenkonzentration der Porenlösung eines Betons mit Opalsandstein und Flint bereits in den ersten Tagen deutlich geringer ist als die eines Betons mit inertem Kalkstein. Durch den hohen Anteil an alkaliempfindlichen Bestandteilen werden entsprechend viele Kaliumionen in den Reaktionsprodukten der AKR gebunden. Bei Beton mit Kies-Edelsplitt des Oberrheins sinkt die Kaliumionenkonzentration nur geringfügig, obwohl diese Betone eine verhältnismäßig große Dehnung bei der Lagerung in der 40°C-Nebelkammer aufweisen (Bild V-16). Aus der Abnahme der Alkaliionenkonzentration der Porenlösung kann daher nicht auf eine entsprechend starke Schädigung des Betons geschlossen werden. In

weiteren Untersuchungen wird geklärt, welche Alkaliionenkonzentration für eine schädigende AKR bei verschiedenen Gesteinskörnungen erforderlich ist.

Alkalizufuhr von außen

Erfahrungen im Betonstraßenbau (Lastfall „Straße“) weisen darauf hin, dass eine Alkalizufuhr von außen in Kombination mit einer Frostbeanspruchung eine schädigende AKR hervorrufen oder verstärken kann, wenn die Gesteinskörnungen alkalireaktive Bestandteile enthalten. Die genauen Zusammenhänge sind noch nicht geklärt. In Zusammenarbeit mit der Bauhausuniversität Weimar wurde hierzu ein Forschungsvorhaben initiiert. Es werden Betone verschiedener Zusammensetzung einer Frost-, einer Tausalz- sowie einer kombinierten Frost-Tausalz-Belastung ausgesetzt und eine ggf. einsetzende Schädigung infolge einer AKR anhand von Dehnungen der Balken und der Rissbildung am Würfel verfolgt. In einigen Fällen sollen die Betone zudem mechanisch vorgeschädigt werden. Die Auswirkung verschiedener Taumittel wird überprüft. Weiterhin werden Alkali-Profile über den Probekörperquerschnitt erstellt. In Kombination mit Gefügeuntersuchungen soll so der Zusammenhang zwischen Tausalz-Belastung und AKR beurteilt werden

Prüfverfahren

Wenn eine alkaliempfindliche Gesteinskörnung verwendet werden muss, weil aus wirtschaftlichen Gründen eine unempfindliche Gesteinskörnung nicht zur Verfügung steht, ist eine Beurteilung ihrer Alkaliempfindlichkeit eine wesentliche



Bild V-18:
Luft- und Fußbadlagerung von 30-cm-Würfeln im Freien

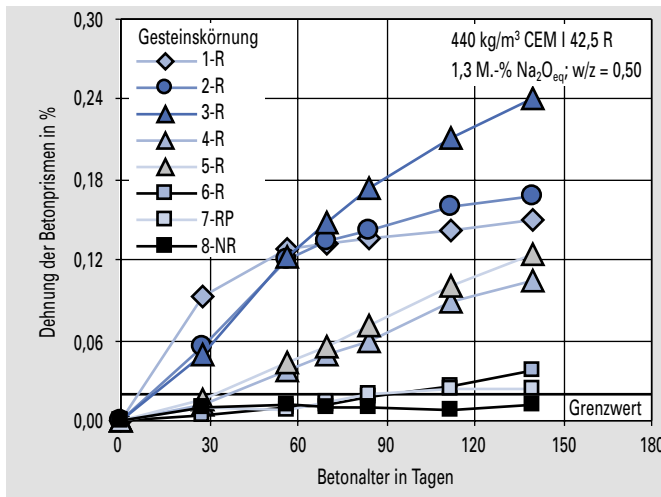


Bild V-19: Dehnung von Betonprismen (7,5 x 7,5 x 28 cm) mit verschiedenen Gesteinskörnungen (R = reaktiv; RP = reaktiv mit Pessim; NR = nicht reaktiv) beim 60-°C-Betonprüfverfahren (RILEM AAR-4)

Voraussetzung für die Auswahl angemessener Maßnahmen zur Vermeidung einer Betonschädigung. Bisher liegen für diese Beurteilung in Europa keine grenzübergreifend anwendbaren Prüfverfahren vor. Dies liegt vor allem an den national unterschiedlichen Erfahrungen mit einer schädigenden AKR. Es fehlen Untersuchungsergebnisse, bei denen das Verhalten verschiedener Gesteinskörnungen in unterschiedlichen Prüfverfahren mit dem in der Praxis bzw. unter praxisgerechten Bedingungen verglichen wurde. Diese Lücke soll in dem von der EU geförderten PARTNER-Projekt, an dem 24 Einrichtungen vorrangig aus Westeuropa beteiligt sind, geschlossen werden. Ziel ist die Entwicklung einer für Europa einheitlichen Prüfsystematik zur Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen.

Es wurden Daten zu den in Westeuropa bekannten alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen gesammelt. Sie sollen in einem Atlas mit mikroskopischen Detailaufnahmen sowie exakten petrographischen Be-

schreibungen und Informationen zum baupraktischen Verhalten der Gesteinskörnungen veröffentlicht werden. 22 dieser Gesteinskörnungen wurden für die Laboruntersuchungen ausgesucht und ihre Kenngrößen bestimmt, um nachfolgend ihre Alkaliempfindlichkeit mit bereits vorliegenden Verfahren zu überprüfen. Es werden 3 petrographische Analysemethoden, 1 chemische Methode, 2 Mörtelprüfungen, 4 Betonprüfungen sowie Freilagerungsversuche durchgeführt und ihre Ergebnisse miteinander und mit den Erfahrungen aus der Praxis verglichen. Abschließend werden Ringversuche durchgeführt, um statistische Daten hinsichtlich Vergleichbarkeit und Wiederholbarkeit der Prüfverfahren zu erhalten.

Im FIZ wurden bisher neben petrographischen Untersuchungen hauptsächlich Betonprüfungen durchgeführt und die Freilagerungsversuche (vgl. Bild V-18) an 8 verschiedenen Orten in Europa organisiert. Die Orte spiegeln das kalte gemäßigte nordeuropäische Klima mit und oh-

ne Alkalizufuhr von außen, das gemäßigte mitteleuropäische Klima und das warme südeuropäische Klima wider.

In Bild V-19 sind die Dehnungen von Betonprismen ($z = 440 \text{ kg/m}^3$; $w/z = 0,50$) dargestellt, die unter Verwendung von reaktiven und nicht reaktiven Gesteinskörnungen aus europäischen Vorkommen hergestellt wurden. Die Probekörper wurden gemäß RILEM AAR-4 bei 60 °C über Wasser gelagert. Es ist zu erkennen, dass die Dehnung aller dargestellten Betone mit reaktiven Gesteinskörnungen bereits nach ca. 90 Tagen den Grenzwert von 0,02 % überschreitet. Um eine Anbindung an die bisherigen Erfahrungen in Deutschland herzustellen, wurden Betone mit den gleichen Gesteinskörnungen in Anlehnung an Teil 3 der deutschen Alkali-Richtlinie geprüft. Diese Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen. Jedoch deutet der derzeitige Untersuchungsstand an, dass das 60-°C-Prüfverfahren „schärfer“ zu sein scheint als die Prüfung in der 40-°C-Nebelkammer.

Performance-Prüfung

Aus wirtschaftlichen Gründen ist es erforderlich, dass auch mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen unter Einsatz der regional verfügbaren Zemente und Zusatzstoffe Betone hergestellt werden können, bei denen keinerlei Bedenken hinsichtlich einer schädigenden AKR bestehen. Hierzu wird ein Performance-Prüfverfahren entwickelt, mit dem praxisgerechte Betonzusammensetzungen innerhalb kurzer Zeit auf eine mögliche schädigende AKR geprüft werden können. Das oben erwähnte 60-°C-Verfahren wird hierfür in Frankreich schon angewendet. In einem von der AiF geförderten Vorhaben werden im FIZ unterschiedliche Betonzusammensetzungen mit den in Deutschland als alkaliempfindlich bekannten Gesteinskörnungen geprüft. Die Ergebnisse werden mit den langjährigen Beobachtungen an verschiedenen Bauteilen und an praxisnah auf dem Dach des FIZ gelagerten Proben verglichen. Erste Ergebnisse lassen vermuten, dass dieses Verfahren zumindest für dichte Gesteinskörnungen verwendet werden kann.

Dauerhaftigkeit

Betonbauwerke müssen während ihrer gesamten Lebensdauer eine ausreichende Dauerhaftigkeit, d.h. einen hohen Widerstand gegenüber Umwelteinflüssen aufweisen. Hierzu gehört neben der Widerstandsfähigkeit gegenüber Frost- und Frost-Tausalz-Angriffen unter anderem auch der Widerstand gegenüber Beton angreifenden

Medien, wie z. B. sulfathaltigen Wässern. Die derzeit gültigen Regelwerke enthalten für Betone, die dauerhaftigkeitsrelevanten Angriffen ausgesetzt sind, Anforderungen an die Ausgangsstoffe (z. B. Zementart, Gesteinskörnungsart) und an die Zusammensetzung (z. B. Wasser/Zement-Wert und Luftgehalt des Frischbetons). Diese betontechnischen Vorgaben beruhen auf langjährigen Erfahrungen im Betonbau mit normalfestem Beton. Sie lassen bei sachgerechter Verarbeitung und Nachbehandlung eine hohe Dauerhaftigkeit dieser Betone erwarten.

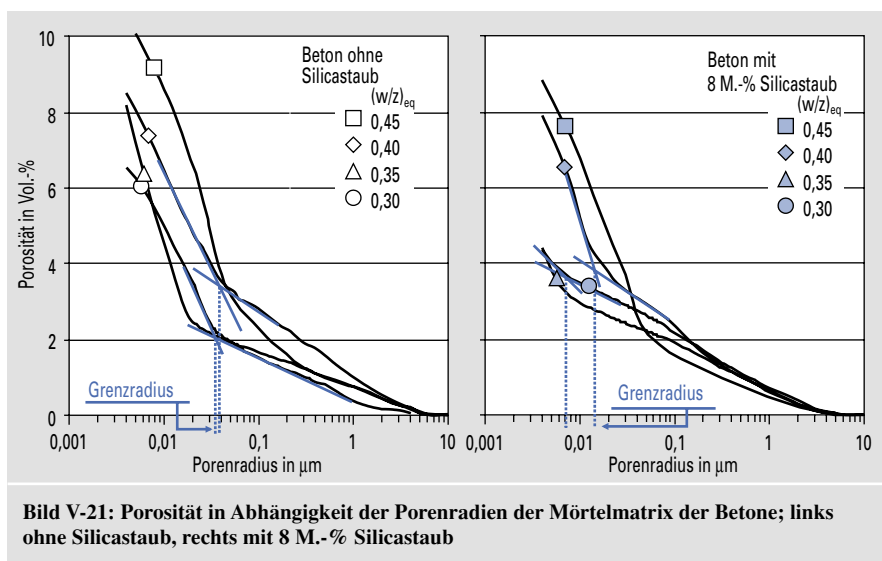
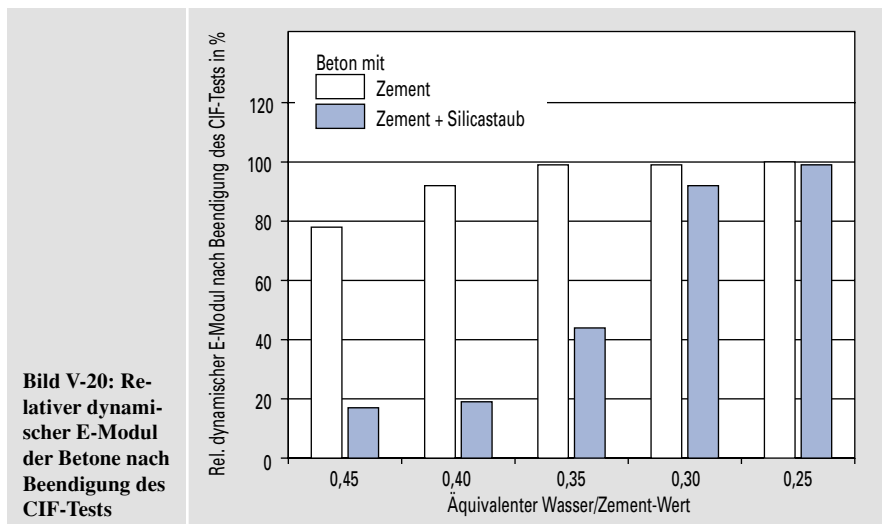
Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand

Bei Schäden infolge eines Frostangriffs wird zwischen äußerer und innerer Schädigung unterschieden. Äußere Schäden zeigen sich in Form von Oberflächenabwitterungen. Dabei werden kleine Partikel oder dünne Schichten aus der Oberfläche des Betons herausgelöst oder abgesprengt. Durch Taumittel werden die Schäden in der Regel verstärkt. Eine innere Gefügeschädigung beschreibt die fortschreitende Zerstörung des tiefer liegenden Betongefüges. Durch die 9%ige Volumenzunahme des Wassers bei der Eisbildung entstehen dann Spannungen, wenn im Gefüge nicht genügend Ausweichraum (in Form von Poren) vorhanden ist. Zu Gefügeschäden kommt es, wenn die erzeugten Spannungen die Zugfestigkeit des Betons überschreiten. Zunächst sind Schäden optisch von außen nicht erkennbar, können jedoch z. B. mit Hilfe der Messung der Ultraschalllaufzeit festgestellt werden.

Laboruntersuchungen bei reinem Frostangriff an Betonen ohne künstlich eingebrachte Luftporen haben gezeigt, dass bei einigen Betonen ein Abfall des dynamischen E-Moduls (= innere Schädigung) gemessen werden kann, auch wenn die Proben äußerlich intakt erscheinen und nur geringe Oberflächenabwitterungen aufweisen. Welche Bedeutung der Abfall des dynamischen E-Moduls von Laborproben hinsichtlich der zu erwartenden Eigenschaften des Betons nach einer Frostbeanspruchung hat, ist im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit der Betone in der Praxis nicht geklärt.

Frostwiderstand hochfester Betone

Im Forschungsinstitut wurde das Forschungsvorhaben „Frostwiderstand dichter hochfester Betone“ zum Abschluss gebracht. Es wurden Betone mit 500 kg/m³ Zement bzw. Zement und Silicastaub untersucht. Der Silicastaubgehalt betrug



8 M.-% bezogen auf den Zementgehalt. Der äquivalente Wasserzementwert $(w/z)_{eq}$ variierte zwischen 0,25 und 0,45. Alle Betone ohne Silicastaub und die Betone mit Silicastaub und einem $(w/z)_{eq} < 0,35$ wiesen selbst nach 100 Frost-Tauwechseln keinen Abfall des relativen dynamischen E-Moduls und damit einen hohen Frostwiderstand auf. Dagegen zeigten die silicastaubhaltigen Betone mit einem $(w/z)_{eq} \geq 0,35$ z. T. schon nach wenigen Frost-Tauwechseln eine deutliche Abnahme des relativen dynamischen E-Moduls (Bild V-20).

Wie zuvor beschrieben entstehen innere Gefügeschädigungen infolge des Frostangriffs durch Spannungen beim Gefrieren des Porenwassers. Das Verhältnis zwischen vorhandenem Porenwasser und Ausweichraum ist der Porenfüllungsgrad. Entsprechend der Theorie wird ein Beton innerhalb eines oder zumindest weniger Frost-Tauwechsel geschädigt, wenn der Porenfüllungsgrad einen Wert von rund 91 %, d. h. die nach Fagerlund definierte „kritische Sättigung“, erreicht. Aus diesem

Grund konzentrierten sich die Arbeiten auf das Gefüge und den Feuchtgehalt der hochfesten Betone. Die Untersuchungen zur Bedeutung des relativen dynamischen E-Moduls als charakteristische Größe der inneren Gefügeschädigung wurden zudem fortgeführt.

Porengrößenverteilung der Betone

Die Hg-Porosität der Mörtelmatrix der hochfesten Betone wurde mit Hilfe der Quecksilber-Druckporosimetrie in Abhängigkeit der Porenradien bestimmt. Bei der Untersuchung im Alter von 28 Tagen nahm die Porosität mit sinkendem $(w/z)_{eq}$ infolge des dichteren Gefüges ab (Bild V-21). Die gesamte Hg-Porosität und der in ihr enthaltene Kapillarporenanteil war bei den Mörteln der silicastaubhaltigen Betone geringer als bei den vergleichbaren Mörteln der Betone ohne Silicastaub.

Aus den Ergebnissen der Porengrößenverteilung wurde mit dem Grenzradius eine weitere charakteristische Größe zum Gefüge der Betone abgeleitet (Bild V-21). Der

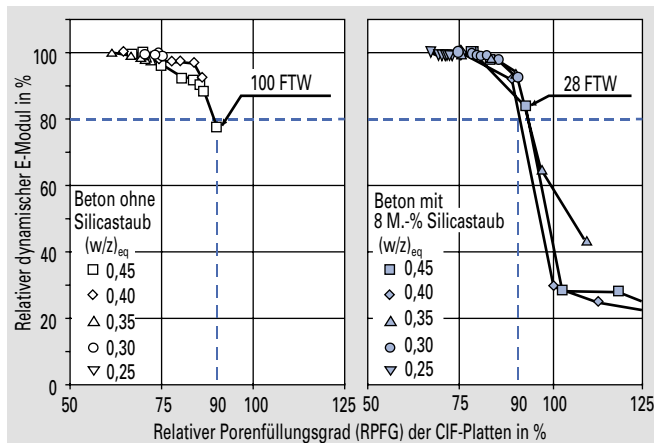


Bild V-22: Relativer dynamischer E-Modul in Abhängigkeit des relativen Porenfüllungsgrades der Betone; links ohne Silicastaub, rechts mit 8 M.-% Silicastaub (Ergebnisse des CIF-Tests von 0 bis max. 100 Frost-Tauwechsel [FTW])

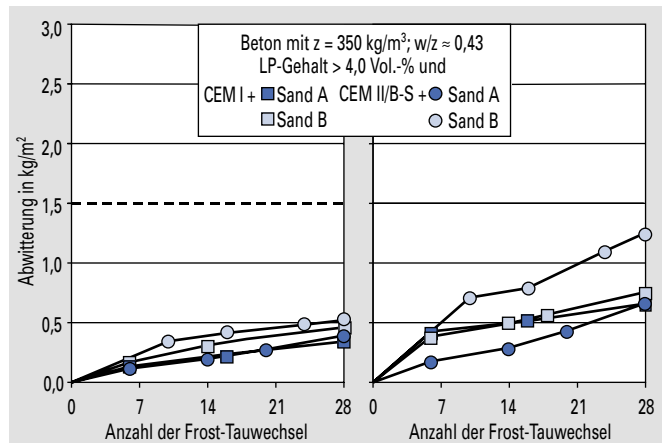


Bild V-23: Abwitterung in Abhängigkeit der Frost-Tauwechsel der Betone, bestimmt mit dem CDF-Verfahren; links normgemäße Nachbehandlung, rechts verkürzte Nachbehandlung

Grenzradius beschreibt die Porengröße, ab der erstmals größere Mengen Quecksilber in das Gefüge eindringen. An dieser Stelle ist die Kontinuität des Porengefüges gestört. Der Transport von Flüssigkeiten durch bestimmte Porenanteile wird an dieser Stelle („pore blocking effect“) beeinträchtigt. Auf hochfeste Betone übertragen kann das bedeuten, dass die für den Abbau der Spannungen infolge eines Frostangriffs notwendigen Ausweichräume vom Porenwasser nicht oder nur zum Teil erreicht werden können. Mit fallendem $(w/z)_{eq}$ verschieben sich die Grenzradien im Allgemeinen zu feineren Porenradialen.

Bei der Auswertung der Hg-Porosität, der Gel- bzw. der Kapillarporenanteile sowie des Grenzradius wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Betonen ohne und mit Silicastaub gefunden, mit deren Hilfe das beobachtete, unterschiedliche Verhalten der silicastaubhaltigen hochfesten Betone bei einer Frostbeanspruchung hinreichend hätte erklärt werden können.

Gefügeeigenschaften und Frostwiderstand

Die Gesamtporosität der Betone wurde als Wasseraufnahme bei 15 MPa im Alter von 28 Tagen bestimmt. Sie nahm erwartungsgemäß mit sinkendem äquivalentem Wasserzementwert ab. Bei gleichem $(w/z)_{eq}$ wiesen Betone mit Silicastaub eine um ca. 7 bis 9 % größere Gesamtporosität auf als die Betone ohne Silicastaub. Zum gleichen Zeitpunkt wurde durch Trocknung bei 105 °C bis zur Massenkonstanz der natürliche Feuchtegehalt der Betone bestimmt. Er war für die silicastaubhaltigen Betone generell größer als für die Betone ohne Silicastaub. Bei den Betonen mit $(w/z)_{eq} \geq 0,35$ lag der Unterschied bei ca. 30 %,

während er bei den Betonen mit $(w/z)_{eq} \leq 0,30$ rund 20 % betrug. Ursache für den höheren natürlichen Feuchtegehalt der silicastaubhaltigen Betone ist vermutlich eine veränderte Morphologie der CSH-Phasen infolge der puzzolanischen Silicastaubreaktion, wodurch mehr Wasser physikalisch gebunden wird.

Im Zuge der Frostprüfung mit dem CIF-Verfahren wurde zu jedem Prüfzeitpunkt aus dem Quotienten zwischen dem jeweiligen Gesamtfeuchtegehalt – das ist der Feuchtegehalt nach 28 Tagen zuzüglich der Wasseraufnahme während der Frostprüfung – und der Gesamtporosität der relative Porenfüllungsgrad (RPF) berechnet. In Bild V-22 ist der RPF in Beziehung zu der zum gleichen Zeitpunkt bestimmten Änderung des dynamischen E-Moduls gesetzt. Erreichte der RPF einen Wert von ca. 90 %, war unabhängig von der Betonzusammensetzung eine deutliche Abnahme des relativen dynamischen E-Moduls zu erkennen. Ein zumindest lokales Überschreiten der von Fagerlund definierten „kritischen Sättigung“ führte somit zu den beobachteten Gefügeschäden.

Frost-Tausalz-Widerstand von Fahrbahndeckenbeton mit CEM II/B-S

Im Forschungsinstitut wurde mit einem neuen Forschungsvorhaben zum „Frost-Tausalz-Widerstand von Fahrbahndeckenbeton mit CEM II/B-S-Zement“ begonnen. Ausgangspunkt hierfür war ein Schaden infolge eines Frost-Tausalz-Angriffs an einer Betonfahrbahndecke, die unter Verwendung von CEM II/B-S 32,5 R hergestellt worden war. Mit Ausnahme eines kurzen Teilschnittes, in dem ein anderer Sand verwendet worden war, wurden nach ca. einjähriger Liegezeit (eine Winterperiode)

an der Fahrbahndecke großflächige Abwitterungen des Oberflächenmörtels und vereinzelte Pop-outs beobachtet. Zur Feststellung der Schadensursache wurden im FIZ Bohrkerns, die aus geschädigten Bereichen der BAB A4 entnommen wurden, hinsichtlich des Betongefüges untersucht. Mit den Ergebnissen ließen sich die beobachteten Abwitterungen nicht erklären. Aus diesem Grund wird ein Forschungsprogramm mit dem Ziel durchgeführt, mögliche Einflüsse der Ausgangsstoffe (Zement, Gesteinskörnung, Nachbehandlungsmittel) auf den Frost-Tausalz-Widerstand von Fahrbahndeckenbetonen herauszuarbeiten.

Laboruntersuchungen

Für Fahrbahndecken typische Betonzusammensetzungen mit einem Zementgehalt von 350 kg/m^3 , einem Wasser/Zement-Wert von $0,43 \pm 0,02$ und einem Luftporengehalt im Frischbeton von ca. 4,5 Vol.-% wurden untersucht. Die Konsistenz der Betone wurde durch Variation des Wassergehalts so eingestellt, dass sie für alle Betone annähernd gleich war. Neben handelsüblichem Portland- und Portlandhüttenzement eines Herstellers kamen zwei Portlandhüttenzemente mit feinem bzw. groben Hütten sandmehl (HSM) zum Einsatz. Als Gesteinskörnung wurde Rheinkies, Diabas- und Orthophyridelsplitt sowie zwei Sande mit geringer (Sand A) bzw. hoher Wasseraufnahme (Sand B) verwendet. In den Betonen, die in der Praxis geschädigt waren, war der Sand B mit hoher Wasseraufnahme verwendet worden.

Der Frost-Tausalz-Widerstand wurde als Abwitterung mit dem CDF-Verfahren nach E DIN EN 12390-9 geprüft. Neben der normgemäß gegen eine Teflonscheibe betonierten Oberfläche wurde jeweils auch

eine praxisnahe, mit einem Besenstrich texturierte Betonoberfläche untersucht. Die Probekörper wurden entsprechend der Norm 1 Tag in der Schalung, 6 Tage unter Wasser und 21 Tage im Klimaraum bei 20 °C und 65 % rel. F. nachbehandelt. Zusätzlich kam eine verkürzte Nachbehandlung (1 Tag Schalung, 1 Tag bei 20 °C und 100 % rel. F. und 26 Tage im Klimaraum bei 20 °C und 65 % rel. F.) sowie ein Nachbehandlungsmittel zum Einsatz, das entsprechend den Angaben des Herstellers auf die mit einem Besenstrich texturierte Betonoberfläche aufgesprüht wurde.

Frost-Tausalz-Widerstand

Die Sande konnten eindeutig hinsichtlich ihres Wasserausvermögens differenziert werden. Innerhalb von 24 Stunden nahm Sand A ca. 1,5 M.-% und Sand B ca. 3,5 M.-% Wasser auf. Sämtliche Betone wiesen ein anforderungsgerechtes Luftporensystem mit einem Mikroluftporengehalt > 1,8 Vol.-% und einem Abstandsfaktor deutlich unter 0,20 mm auf. Die Abwitterung sämtlicher, normgemäß nachbehandelter Betone war sehr gering, unabhängig davon, ob die Prüffläche gegen eine Teflonfläche betonierte oder mit einem Besenstrich texturiert wurde (Bild V-23 links). Ein Einfluss der Zementart oder der Sandqualität auf den Frost-Tausalz-Widerstand war nicht feststellbar. Auch bei einer unzureichenden Nachbehandlung (verkürzte Nachbehandlung) war die Abwitterung der Betone gering (Bild V-23 rechts). Lediglich die Kombination aus handelsüblichem Portlandhüttenzement und Sand B schien eine etwas höhere Nachbehandlungsempfindlichkeit aufzuweisen. Jedoch lag auch in diesem Fall die Abwitterung unterhalb des für das CDF-Verfahren nach E DIN EN 12390-9 diskutierten Abnahmekriteriums von 1,5 kg/m².

Fahrbahndeckenzemente müssen über die DIN EN 197-1 hinaus zusätzliche Anforderungen erfüllen. Dies führt dazu, dass vielfach Portlandhüttenzemente mit gröberen Hütten sandmehlen (HSM) verwendet werden. Ähnlich wie grob aufgemahlene Portlandzemente können diese Zemente unter Umständen zu einem höheren Wasserabsondern und möglicherweise zu einer erhöhten Nachbehandlungsempfindlichkeit neigen. Einem hohen Wasserabsondern wird in der Praxis mit einer höheren Feinheit bestimmter Zementhauptbestandteile begegnet. Der Frage, inwieweit die Feinheit von HSM die Nachbehandlungsempfindlichkeit und damit den Frost-Tausalz-Widerstand solcher Betone beeinflusst, soll mit Untersuchungen zum Frost-Tausalz-Widerstand von Fahrbahn-



Bild V-24: Betonprüfkörper (w/z = 0,60) auf Basis von Portlandzement (CEM I 32,5 R) und Quarz-Kies nach 45 Monaten Lagerung in 0,44 %iger Natriumsulfatlösung bei 8 °C

deckenbeton mit im Labor hergestellten Portlandhüttenzementen mit unterschiedlich feinen Hütten sanden nachgegangen werden. Hierzu werden Betone mit der o. g. Zusammensetzung und dem Sand B (hohe Wasseraufnahme) hergestellt und in Anlehnung an das CDF-Verfahren nach E DIN EN 12390-9 geprüft. Weiterhin wird derzeit im Forschungsinstitut ein Vorhaben zum Einfluss und zur Optimierung der Nachbehandlung von Straßendeckenbeton mit unterschiedlichen Zementen vorbereitet. Das Vorhaben wird in Zusammenarbeit mit der Bauhaus-Universität Weimar bearbeitet.

Sulfatwiderstand

In den vergangenen 3 Jahren wurde in Fachkreisen verstärkt die Frage erörtert, ob auch in Deutschland Thaumasischäden an Betonbauwerken wie in England, wo während der letzten 10 Jahre an etwa 50 Betonbauwerken solche Schäden bekannt wurden, möglich sind. Betroffen waren Betone, die man in pyritartige Böden eingebracht hatte. Sie wiesen keinen ausreichenden Sulfatwiderstand auf, da mit einem Sulfatangriff nicht gerechnet wurde. Bei Erstellung der Bauwerke wurden die Böden intensiv belüftet. In Folge dessen oxidierte sulfidhaltiges Gestein zu Sulfat (Pyritoxidation). Es kam zu einem außergewöhnlichen Sulfatangriff. Verschiedentlich wurde dadurch auch der pH-Wert des Grundwassers abgesenkt. Die beobachteten Schäden sind somit auf einen Sulfat- bzw. einen kombinierten Sulfat-Säure-Angriff zurückzuführen, der seinerzeit nicht erkannt wurde.

Das Forschungsinstitut hat die überwiegend ausländischen Erfahrungen und Erkenntnisse zum Thema „Schadenspotential durch Thaumasisbildung“ zusammengetragen und in den Sachstandsbericht „Sulfatangriff auf Beton“ eingebracht, der 2004 vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) herausgegeben wurde. Um die Übertragbarkeit der englischen Erkenntnisse auf die deutschen Verhältnisse zu

überprüfen, wurde vom DAfStb auch ein Vergleich der pyritartigen Böden in Deutschland und England vorgenommen. Die Ergebnisse sind ebenfalls im Sachstandsbericht dargestellt. So kommen hierzulande durchaus vergleichbare pyritartige Böden wie in England vor, beispielsweise der Poseidonschiefer. In den betroffenen Regionen ist daher mit der Möglichkeit eines Sulfatangriffs durch Pyritoxidation zu rechnen. Da bisher jedoch noch keine Schäden bekannt sind, ist davon auszugehen, dass die Betone hierzulande gemäß den Anforderungen der Betonnorm DIN 1045-2 ausreichend widerstandsfähig sind. Im Grundsatz wird schon heute eine Gefährdung von Betonbauteilen durch Pyrit im Boden durch die DIN 4030-1 behandelt und bei einem Sulfidgehalt von über 0,01 M.-% eine gesonderte Beurteilung durch einen Fachmann gefordert. Da nahezu alle Böden Pyrit in dieser Größenordnung enthalten, soll nach Ansicht einer vom DAfStb eingesetzten Arbeitsgruppe die DIN 4030-1 diesbezüglich präzisiert werden. Die notwendigen Ergänzungen werden vom zuständigen Normenausschuss in Kürze vorgenommen.

Infolge der Thaumasischadensfälle wurde vor 3 Jahren in England das Regelwerk für die Betonbauweise bei Sulfatangriff modifiziert. So wurde der Einsatz carbonathaltiger Gesteinskörnungen und carbonathaltiger Zemente eingeschränkt. Vor diesem Hintergrund wurde auch hierzulande die Verwendung carbonathaltiger Bestandteile im Beton diskutiert. Jedoch gibt es bisher nur wenige systematische Untersuchungen zum Einsatz carbonathaltiger Gesteinskörnungen (Kalkstein, Dolomit) und carbonathaltiger Zement und Zement-Flugasche-Gemische bei Sulfatangriff. Die im Forschungsinstitut durchgeführten Laboruntersuchungen zeigten, dass bei niedriger Temperatur eine gefügaufweichende Thaumasisbildung auftreten kann, wenn der Beton carbonathaltige Bestandteile enthält und nicht normgerecht hergestellt wurde.



Bild V-25: Betonprüfkörper ($w/z = 0,60$) auf Basis von Portlandzement (CEM I 32,5 R) und Kalksteinsplitt nach 45 Monaten Lagerung in 0,44 %iger Natriumsulfatlösung bei 8 °C



Bild V-26: Betonprüfkörper ($w/z = 0,60$) auf Basis von HS-Zement (CEM III/B-HS) und Kalksteinsplitt nach 45 Monaten Lagerung in 0,44 %iger Natriumsulfatlösung bei 8 °C

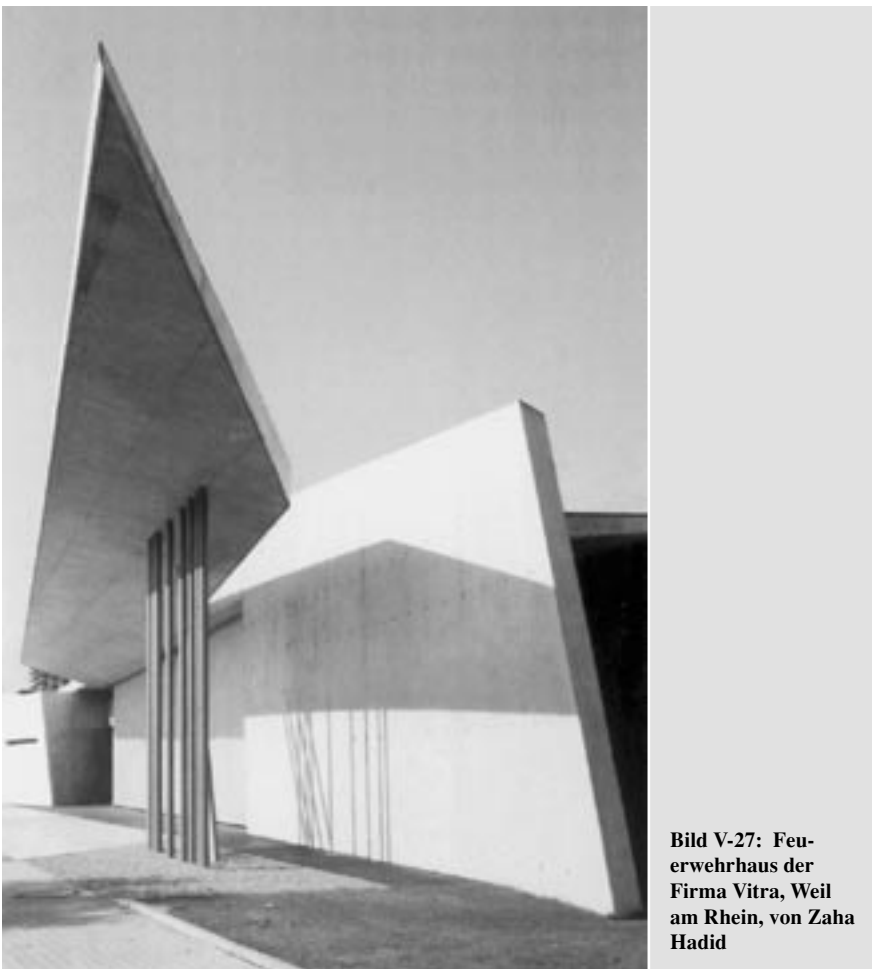


Bild V-27: Feuerwehrraum der Firma Vitra, Weil am Rhein, von Zaha Hadid

Dies wird in den Bildern V-24 und V-25 verdeutlicht. Prüfkörper auf Basis von Portlandzement zeigten nur dann deutliche Thaumasischäden, wenn Kalkstein anstelle von Quarz als Gesteinskörnung verwendet wurde. Bei normgerechten Prüfkörpern auf Basis von HS-Zementen entstanden hingegen auch bei Verwendung von Kalkstein keinerlei Sulfatschäden, weder in Form von Treibphasen- noch von Thaumasisbildung (Bild V-26).

Auch das Sulfatwiderstandsverhalten von Portlandkalksteinzement-Flugasche-Gemischen wurden am Forschungsinstitut untersucht (siehe auch Kapitel III). Die Ergebnisse bestätigen die Auffassung des DAfStb, dass die verschiedentlich in Laborversuchen beobachtete Thaumasisbildung die Folge einer unzureichenden Gefügeverdichtung, also eines unzureichenden physikalischen Sulfatwiderstandes ist. Gründe hierfür sind die hohe Anfangsporosität, hervorgerufen durch einen Wasser/Zement-Wert von 0,60, und die bei niedriger Umgebungstemperatur (< 10 °C) herabgesetzte Reaktivität der Flugasche.

Um die Ergebnisse von Laboruntersuchungen besser mit den Erfahrungen aus der Praxis in Einklang bringen zu können, sollen in den nächsten 3 Jahren mit Betonprüfkörpern Auslagerungsversuche sowie praxisnähere Laborversuche durchgeführt werden. Im Auftrag des DAfStb werden diese Arbeiten vom Forschungsinstitut gemeinsam mit der Universität Weimar und der TU München durchgeführt.

Sichtbeton ■

Sichtbeton erfreut sich in der architektonischen Gestaltung von Gebäuden einer neuen Beliebtheit. Der in der Schalung beliebig formbare künstliche „Stein“ Beton ist in besonderem Maße geeignet, gleichermaßen konstruktive und gestalterische Aufgaben zu erfüllen. Namhafte Architekten – z. B. Ieoh Ming Pei, Tadao Ando und Zaha Hadid – nutzen die nahezu unerschöpflichen Gestaltungsmöglichkeiten des Baustoffs Beton, um ihre Architekturvisionen Wirklichkeit werden zu lassen (Bild V-27). Dabei ist die baupraktische Realisierung des vorgegebenen optischen Erscheinungsbildes der Betonoberfläche ganz entscheidend für das Erreichen der gestalterischen Ziele des entwerfenden Architekten oder Ingenieurs. Nach deren Auffassung soll nicht mehr eine stark texturierte Betonoberfläche, sondern die Form des Baukörpers das Erscheinungsbild prägen. Zunehmend werden kompliziert geformte, schlanke, stark bewehrte

Bauteile mit glatten, porenfreien, farblich einheitlichen Ansichtsflächen und scharfen Kanten ohne erkennbare Arbeitsfugen gefordert. Diese Forderungen können jedoch mit dem jetzigen Wissensstand im Bereich der Betontechnologie, der Schalungs- und Ausführungstechnik nicht immer zielsicher erfüllt werden.

Forschungsbedarf

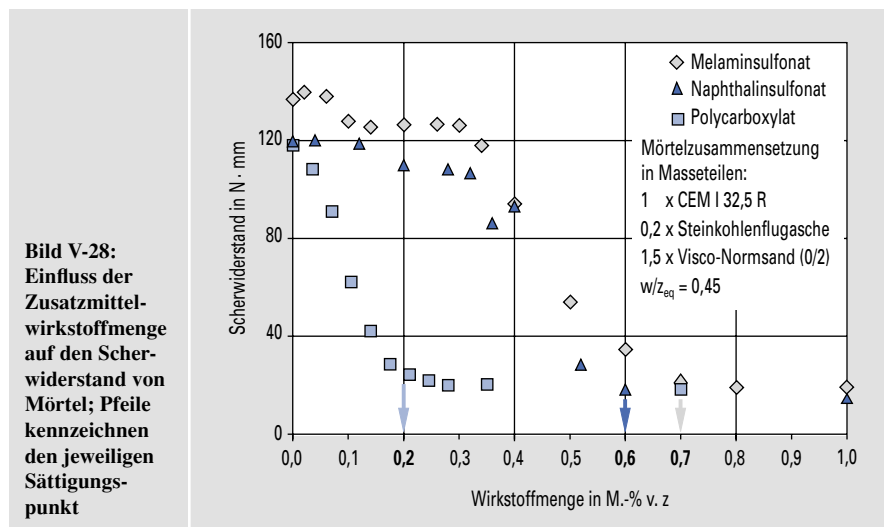
Das Erreichen vorgegebener Betonoberflächenqualitäten ist während des Betoniervorgangs weder überprüf- noch steuerbar. Erst nach dem Entschalen und Trocknen der Betonoberfläche kann die erreichte Qualität des Sichtbetons bewertet werden. Dabei führen immer wieder Farbunterschiede zu Beanstandungen, die auch bei sachgerechter Planung und Ausführung nicht zielsicher zu vermeiden sind. Hierzu gehören partielle Verfärbungen und Porenbildungen, aber auch flächig auftretende „Wolkenbildungen“ und „Marmorierungen“ infolge Trennmittelwirkung, zu starker Verdichtung, Verfärbungen der Schalung und Ausbluten des Betons an nicht vollständig vermeidbaren Undichtigkeiten der Schalung. Der Erfolg einer gelungenen Sichtbetonoberfläche hängt derzeit mehr von den persönlichen empirischen Erfahrungen der jeweiligen Bauausführenden bzw. von der mit dem Betonentwurf oder mit der Betreuung betrauten Fachleute ab, als von gesicherten Erkenntnissen. Aus den Erfahrungen wurden bislang einige Grundregeln zur Vermeidung von Sichtbetonmängeln abgeleitet, die das neue Sichtbeton-Merkblatt des Deutschen Beton- und Bautechnik-Vereins (DBV) und des Bundesverbands der Deutschen Zementindustrie (BDZ) enthält. Es fehlt jedoch eine wissenschaftlich fundierte Beschreibung der Ursachen und Zusammenhänge der zu Beanstandungen führenden Phänomene.

Verbundforschung – Sichtbeton

Unter gemeinsamer Federführung des Vereins Deutscher Zementwerke e. V. (VDZ) und des Deutschen Beton- und Bautechnik-Vereins e. V. (DBV) wird ein von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF) gefördertes Untersuchungsprogramm „Verbundforschung Sichtbeton“ durchgeführt. Dieses Programm umfasst insgesamt 4 Forschungsanträge, die von 6 Forschungsstellen bearbeitet werden. Einen Überblick über die beteiligten Forschungsstellen und -schwerpunkte gibt **Tafel V-2**. In enger Zusammenarbeit sollen die Zusammenhänge, die zu Beanstandungen bei Sichtbetonflächen führen, aufgeklärt werden. Auf der Basis der ge-

Tafel V-2: Übersicht über beteiligte Forschungsstellen und -schwerpunkte der „Verbundforschung Sichtbeton“

Forschungsstelle(n)		Thema
1.1	Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf	Einflüsse auf die rheologischen Eigenschaften und das Sedimentationsverhalten von Mehlkomleim und Beton unter besonderer Berücksichtigung der Vibrationsverdichtung im Vergleich zur Selbstverdichtung
1.2	Institut für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung der TU München	Transportmechanismen im erhärtenden Beton – Transport- und Kristallisationsvorgänge im Hinblick auf Farberscheinungen
2	Lehrgebiet Baustoffwissenschaften und Baustoffprüfung der TU Berlin	Sichtbeton: Untersuchung der chemisch-physikalischen Wechselwirkungen zwischen Frischbeton, Schalungshaut und Trennmittel als Grundlage neuer Prüfmethoden für die Baupraxis
3	Institut für Baustoffe der Universität Hannover	Robuste Sichtbetonzusammensetzungen und ihre Prüfung
4.1	Institut für Baubetrieb der TU Darmstadt	Wechselwirkungen zwischen Schalungshaut, Trennmittel und Betonfläche
4.2	Laboratorium für Bau- und Werkstoffprüfung FHS Köln	



wonnenen Erkenntnisse werden Mechanismen und Einflussgrößen sowie wirksame Steuerungsmaßnahmen zur Vermeidung von Farberscheinungen abgeleitet.

Der Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten des Forschungsinstituts liegt in der Untersuchung der Einflüsse auf das Sedimentationsverhalten von Zementleim und Beton mit Fließmittel bei Vibrationsverdichtung. In einem ersten Schritt wurden für verschiedene Zement/Zusatzstoff/Zusatzmittel-Kombinationen an Mörteln, deren Zusammensetzung aus Sichtbeton-Rezepturen abgeleitet wurde, jeweils der Sättigungspunkt bestimmt. Dieser Punkt kennzeichnet die maximale Verflüssigungswirkung des Fließmittels, ohne dass dabei eine Sedimentation des Mörtels auftritt. Die Sättigungspunkte für mit Fließmittel hergestellte Mörtel sind in **Bild V-28** dargestellt. Zum Einsatz kamen 3 jeweils aus einem Wirkstoff (Melaminsulfonat,

Naphthalinsulfonat, Polycarboxylatether) bestehende Fließmittel. Aus der Grafik geht hervor, dass das Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatether (PCE) – wie bekannt – am wirksamsten ist. Bereits bei einer Wirkstoffmenge von rd. 0,2 M.-% bezogen auf den Zement ist der Sättigungspunkt erreicht. Bei den Fließmitteln auf Basis von Naphthalin- bzw. Melaminsulfonat stellte sich die maximale Verflüssigung erst bei 0,6 bzw. 0,7 M.-% Wirkstoff ein. Dies ist auf die unterschiedliche Wirkungsweise der Fließmittel zurückzuführen. Bei dem elektrostatisch wirkenden Naphthalin- bzw. Melaminsulfonat werden für die vollständige Umladung der Partikeloberfläche große Mengen an Wirkstoff benötigt. Im Gegensatz dazu genügt bei dem Polycarboxylat aufgrund der sterischen Wirkung, d. h. der räumlichen Abstoßung der Seitenketten, schon eine relativ geringe Wirkstoffmenge zur Erreichung des Sättigungspunktes. Zur Erzielung einer ausreichenden Sedimenta-

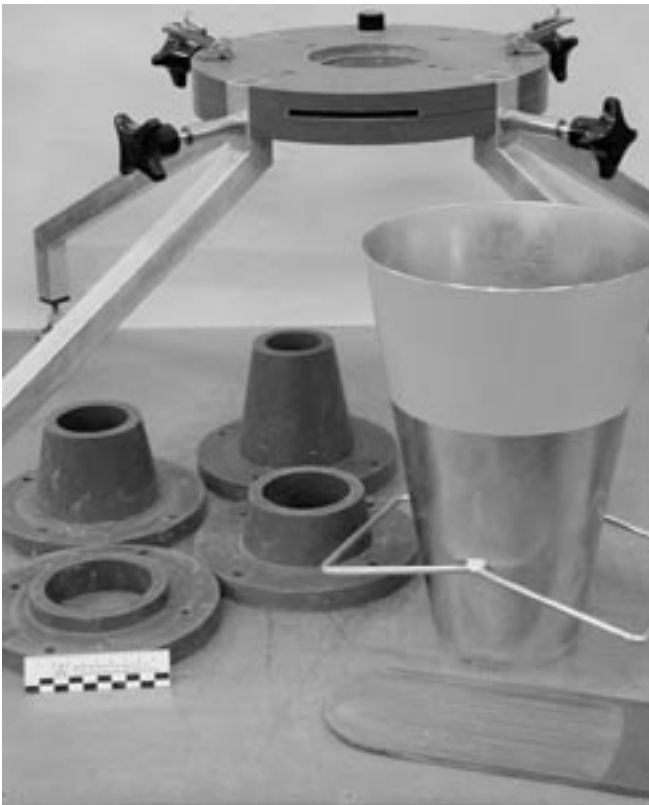


Bild V-29: Bestandteile des Auslaufkegels: Setztrichter, Setztrichterhalterung, Auslaufdüsen und Schieber



Bild V-30: Ermittlung der Auslaufzeit und des Setzfließmaßes mit dem Auslaufkegel

tionsstabilität des Mörtels muss, insbesondere beim Einsatz von Fließmitteln auf der Basis von PCE, die Dosierung mit großer Sorgfalt erfolgen.

Auf diesen Erkenntnissen aufbauend werden Sedimentationsversuche an Mörteln durchgeführt. An „stabilen“ Mörteln wird der Einfluss von Verdichtungsenergie auf das Sedimentationsverhalten untersucht. Die Übertragbarkeit der an den Mörteln gewonnenen Erkenntnisse wird durch Betonversuche überprüft.

Selbstverdichtender Beton ■

Selbstverdichtender Beton (SVB) ist ein Hochleistungsbeton, dessen besonderes Leistungsvermögen in der Frischbetoneigenschaft „Selbstverdichtung“ besteht. Er weist ein großes Potenzial für die Rationalisierung nicht nur der Betonfertigteilproduktion, sondern auch des Bauablaufs auf der Baustelle auf. Um diese Vorteile zu nutzen, ist größte Sorgfalt bei der Herstellung und in der Qualitätssicherung zwingend erforderlich.

Die in der DAfStb-Richtlinie verankerte „Fensterlösung“ für SVB ermöglicht dem

Hersteller von selbstverdichtendem Beton, die Verarbeitbarkeits-eigenschaften seines SVB in Frisch- und Festbetonuntersuchungen zu ermitteln und in der Erstprüfung zu belegen. Der Hersteller sichert die Eigenschaft „Selbstverdichtung“ zu und gibt die Zielwerte und zulässigen Abweichungen für das Setzfließmaß und die Trichterauslaufzeit an. Die Grenzen des Fensters müssen in der laufenden Produktion durch die Eigenüberwachung kontinuierlich überprüft werden, da sie sich durch Schwankungen der Ausgangsstoffe verändern können. Befindet sich mindestens ein Wert, z. B. bei der Übergabe vor dem Einbau, nicht im Fenster, wird der Beton verworfen, oder es müssen geeignete Korrekturmaßnahmen (z. B. Fließmittelnachdosierung) eingeleitet werden, um den SVB wieder in den Verarbeitbarkeitsbereich, d. h. in die Grenzen des nachgewiesenen SVB-Fensters, zu bringen. Um den Prüfaufwand bei der Übergabe von selbstverdichtendem Beton als Transportbeton auf der Baustelle zu verringern, darf gemäß Abschnitt 5.4.1 der SVB-Richtlinie alternativ zur Trichterauslaufzeit die Fließzeit verwendet werden, wenn in der Erstprüfung ein eindeutiger Zusammenhang zur Trichterauslaufzeit nachgewiesen wird.

Im Rahmen eines Gemeinschaftsvorhabens der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. (FTB), Kamp-Lintfort, und des Forschungsinstituts der Zementindustrie (FIZ) wurde neben der Ermittlung der Einflüsse auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften selbstverdichtender Betone auch die Möglichkeit untersucht, einen Setztrichter so zu modifizieren, dass damit reproduzierbar und ausreichend genau Auslaufzeiten gemessen werden können. Durch die Verlängerung des Setztrichters auf unterschiedliche Auslaufquerschnitte unter Beibehaltung der Kegelneigung und des zu prüfenden Betonvolumens ließen sich die Auslaufzeiten variieren. Dazu wurde ein handelsüblicher Setztrichter auf eine Halterung mit Stativ montiert, der durch einen Schieber in der Halterung an der Unterseite verschlossen werden konnte. An der Unterseite der Halterung ließen sich verschiedene Auslaufdüsen mit den Durchmessern 50, 60, 70 und 80 mm anbringen. Das Stativ war so eingestellt, dass sich der Setztrichter 300 mm über der Ausbreitplatte befand. **Bild V-29** zeigt den Setztrichter, die Setztrichterhalterung, 4 verschiedene Auslaufquerschnitte und den Schieber. Der montierte Auslaufkegel ist in **Bild V-30** dargestellt.

Zur Ermittlung der Auslaufzeiten mit dem Auslaufkegel wurden 6 unterschiedlich zusammengesetzte selbstverdichtende Betone geprüft. Durch die Kombination der Ausgangsstoffe und deren Proportionierung wurde nahezu der gesamte rheologische Bereich vom niedrigviskosen bis zum hochviskosen selbstverdichtenden Beton abgedeckt. Nach dem Befüllen des Setztrichters und Ziehen des Schiebers wurde analog zum Trichter nach DAfStb-Richtlinie die Zeit gemessen, die der SVB benötigt, um aus dem Kegel auszufließen. Für die Auswertung wurden ausschließlich die Betone verwendet, die während des Prüfzyklus keinen relevanten Verarbeitbarkeitsabfall aufwiesen. Die Veränderungen der Auslaufzeiten der verschiedenen Auslaufkegel im Vergleich zur Auslaufzeit des Trichters sind daher allein auf die unterschiedlichen Querschnitte zurückzuführen.

Bild V-31 zeigt die Auslaufzeiten der Kegel mit den Auslaufdurchmessern 80, 70 und 60 mm über der Trichterauslaufzeit für die untersuchten Betone. Es ergab sich in allen Fällen eine lineare Abhängigkeit zwischen der jeweiligen Kegelauslaufzeit und der Trichterauslaufzeit mit einem Bestimmtheitsmaß von über 90 %. Während sich die Auslaufzeiten der Auslaufkegel mit einem Durchmesser von 80 und 70 mm unterproportional zur Trichterauslaufzeit verhielten, wies der Auslaufkegel mit dem Durchmesser von 60 mm ein leicht überproportionales Auslaufverhalten auf. Der Auslaufkegel mit dem 50-mm-Durchmesser zeigte zwar ebenfalls eine lineare Abhängigkeit mit den Trichterauslaufzeiten für die untersuchten Betone. Er führte aber zu sehr hohen Auslaufzeiten, die baupraktisch als ungünstig angesehen werden können. Daher wurde der 50-mm-Auslaufquerschnitt aus der weiteren Betrachtung ausgenommen. Zusätzlich ist zu beachten, dass bei dem 50-mm-Durchmesser die Sieblinie und die Blockierneigung des SVB einen Einfluss auf die Kegelauslaufzeit ausüben können.

Aufgrund der Untersuchungsergebnisse wurde ein Kegel-Auslaufquerschnitt mit einem Durchmesser von 63,5 mm berechnet, der zu einer nahezu direkten Korrelation mit der Trichterauslaufzeit führte. Der Auslaufkegel stellt somit eine Alternative zur Ermittlung der Viskosität selbstverdichtender Betone dar, die besonders bei der Annahmepfung auf der Baustelle vorteilhaft eingesetzt werden kann.

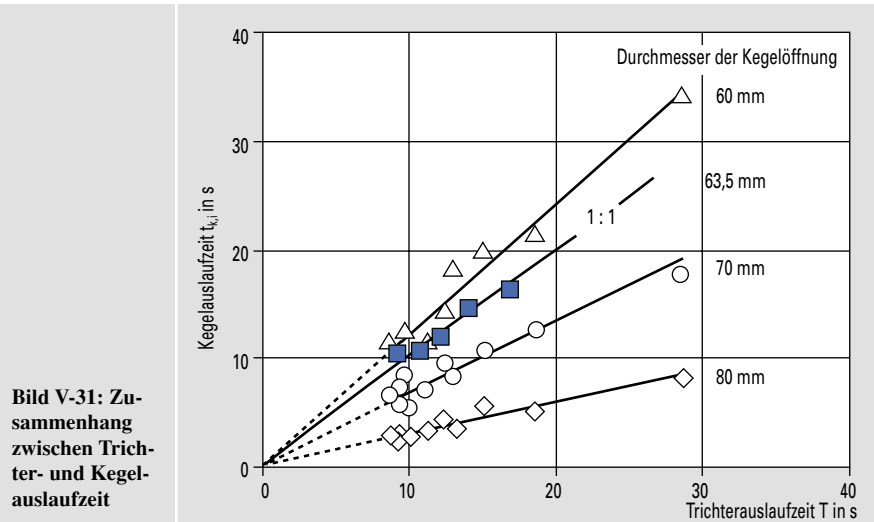


Bild V-31: Zusammenhang zwischen Trichter- und Kegelauslaufzeit



Bild V-32: Sofort-Entformen eines großen Betonrohrs, hergestellt aus erdfeuchtem Beton

Erdfeuchte Betone ■

Erdfeuchte Betone werden für Straßenbauerzeugnisse wie Pflastersteine, Platten, Bordsteine oder Betonrohre verwendet. In stationären Produktionsanlagen der Betonwerke werden die trockenen Betonmischungen durch eine intensive Rüttel-Press-Verdichtung in steifen Stahlformen derart kompaktiert, dass die Produkte sofort entformt werden können und aufgrund der so genannten Grünstandfestigkeit ihre Form behalten (**Bild V-32**). Bei entsprechend sachgerechter Betonzusammensetzung erreichen die so verdichteten Betone die erforderlichen Gebrauchseigenschaften wie hohe Festigkeit und Dichtheit sowie angemessene Dauerhaftigkeit z. B. gegenüber einer Frost-Tausalz-Beanspruchung oder einem chemischen Angriff.

Betontechnologische Weiterentwicklung

Erfahrungsgemäß können Schwankungen im Wassergehalt und bei den Eigenschaften der Betonausgangsstoffe dazu führen, dass erdfeuchte Betone bei der Verarbeitung nicht optimal verdichtet werden können

und deshalb nicht formstabil bzw. grünstandfest sind. Sie erreichen dann nicht die geplanten Gebrauchseigenschaften. In einem von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) geförderten und an der Universität Kassel, Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens, in Zusammenarbeit mit dem Forschungsinstitut der Zementindustrie durchgeführten Forschungsvorhaben wurde untersucht, wie Betone stofflich zusammengesetzt sein sollten, damit trotz größerer Schwankungen bei den Mischungen die geforderten Eigenschaften erzielt werden können.

Die Untersuchungen zeigen, dass sich erdfeuchte Betone durch sandärmere Kornzusammensetzungen und durch die Zugabe von Feinstoffen mittlerer und hoher Feinheit hinsichtlich ihrer Dichtheit und Festigkeit verbessern lassen. Durch die infolge der Feinheit immer stärker werdenden interpartikulären Anziehungskräfte ist die Verwendung leistungsfähiger Fließmittel bzw. Verflüssiger erforderlich. Dadurch können die optimale Packungsdichte und eine ausreichende Gründruckfestigkeit

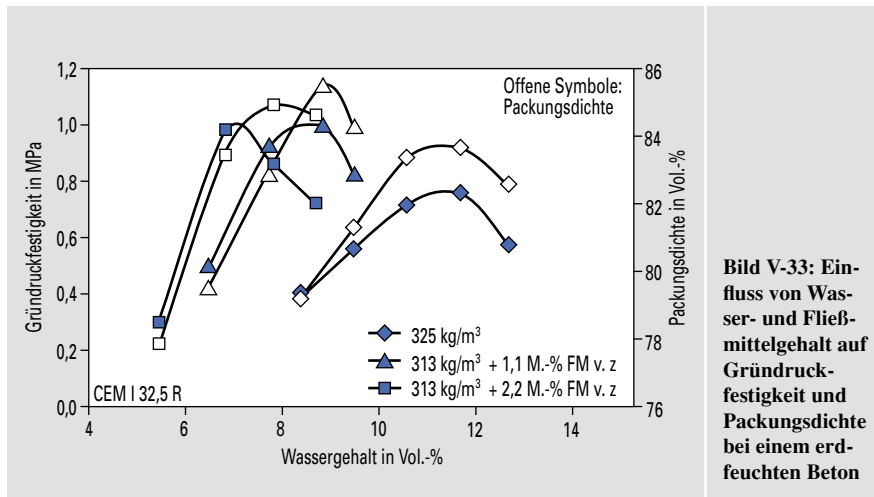


Bild V-33: Einfluss von Wasser- und Fließmittelgehalt auf Gründruckfestigkeit und Packungsdichte bei einem erdfeuchten Beton

bei einem geringen Wassergehalt erreicht und sogar gesteigert werden (Bild V-33). In der Praxis muss eine Optimierung von Mischungen jeweils für ein einzelnes Werk durchgeführt werden, weil die maschinentechnischen Verarbeitungsbedingungen berücksichtigt werden müssen. Bei der Beurteilung von Optimierungsmaßnahmen, wie z. B. beim Ersatz von Zementanteilen durch inerte Feinstoffe, sind Dauerhaftigkeitskriterien unbedingt in die Bewertung einzubeziehen. Zu hohe w/z - bzw. $(w/z)_{eq}$ -Werte und bestimmte Feinstoffe können eine Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeitseigenschaften zur Folge haben, selbst wenn hohe Festigkeiten erzielt werden.

Im Zuge der Untersuchungen wurde ein Prüfgerät mit dynamischer Verdichtung zur praxisnahen Herstellung von Prüfkörpern aus erdfeuchten Betonen entwickelt, das zur Produktionskontrolle eingesetzt werden kann, indem parallel zur Produktion die Gründruckfestigkeit überprüft wird.

Braunverfärbung

Das Problem der Braunverfärbungen, das vornehmlich bei Straßenbau-Erzeugnissen aus erdfeuchtem Beton aufgetreten ist, konnte im Berichtszeitraum durch die Zusammenarbeit von Vertretern der Zementindustrie und der Betonwarenhersteller weiter geklärt werden. Mit Hilfe der vorliegenden Erkenntnisse über die komplexen chemisch-mineralogischen und physikalischen Einflüsse konnte das Auftreten von Verfärbungen analysiert und vielfach eliminiert werden. Für die Problemlösung ist eine umfassende und objektive Fallanalyse wichtig. In dem bilateralen industriellen Gesprächskreis „Braunverfärbungen“ wurde ein Fragebogen bzw. eine Checkliste entwickelt, um im Einzelfall die relevanten stofflichen und produktionsabhängigen Parame-

ter zusammenzustellen und gemeinsam Maßnahmen zur Risikominderung bzw. -vermeidung zu treffen. Das Problembewusstsein und die Bereitschaft, im Dialog Lösungen zu finden, haben offenbar dazu geführt, dass in 2004 nur noch vereinzelt über Braunverfärbungen berichtet wurde. Die Zusammenarbeit im Gesprächskreis wird fortgesetzt.

Wasserdurchlässige Pflasterflächen

Aus Umweltschutzgründen wird bei der Befestigung größerer Flächen, z. B. bei Parkplatzflächen, immer häufiger gefordert, dass das Regenwasser versickern kann. Gleichzeitig wird die Rückhaltung von schädlichen Bestandteilen verlangt, damit diese nicht mit dem versickernden Regenwasser in den Untergrund bzw. das Grundwasser gelangen. In einem Sachverständigenausschuss des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) wurde die Zulassung für entsprechend durchlässige und schadstoffrückhaltende Betonpflastersteine unter Mitarbeit des Forschungsinstituts vorbereitet. Berührt wurde dabei auch die Frage der Umweltverträglichkeit der zementgebundenen Produkte im Hinblick auf den Boden- und Grundwasserschutz. Hierzu erfolgte eine Anbindung an das DIBt-Merkblatt zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser.

Verkehrswegebau

Durch die zentrale Lage in Europa und die fortschreitende EU-Ost-Erweiterung wird das Verkehrsaufkommen, und dabei insbesondere der Güterverkehr, in Deutschland in den nächsten Jahren stark ansteigen. Trotz des Ausbaus des Schienennetzes wird der Hauptteil der Güterverkehrsleistung auf das Fernstraßennetz entfallen. Angesichts

der hohen Verkehrsbelastung und der beginnenden Einführung von Funktionsbauverträgen, bei dem einem bauausführenden Unternehmen die Verantwortung für den Bau und die Unterhaltung einer Straße übergeben wird, tritt die Frage nach der Nutzungsdauer und dem Unterhaltungsaufwand einer Straßenkonstruktion in den Vordergrund. Von Vorteil sind dauerhafte, unterhaltungsarme und damit wirtschaftliche Bauweisen verbunden mit einer hohen Umweltverträglichkeit.

Straßenbau

Ein wichtiges Argument für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton ist die hohe Dauerhaftigkeit auch bei schwerstem Lastwagenverkehr und der geringe Unterhaltungsaufwand während der Nutzungsdauer. Die Lebensdauer von Betondecken beträgt im Allgemeinen mehr als 30 Jahre. Einige wenige Schäden haben zu einer Verunsicherung in der Fachwelt geführt. Die Untersuchungen des FIZ zeigten, dass in einigen Fällen eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) nicht auszuschließen war (siehe Abschnitt Alkali-Kieselsäure-Reaktion). Um vorausschauend eine hohe Sicherheit gegen eine schädigende AKR bei Betonfahrbahndecken zu gewährleisten, hat der VDZ folgende Maßnahmen empfohlen:

1. Senkung des wirksamen Alkaligehalts der Straßendeckenzemente (Tafel V-3),
2. keine Verwendung von reaktiven Gesteinskörnungen der Alkali-Richtlinie,
3. Verwendung von Quarzporphyr, Grauwacke, Splitt des Oberrheins und von allen importierten Gesteinskörnungen nur nach Vorliegen eines Gutachtens.

Diesen Empfehlungen haben sich die Verbände der Gesteinskörnungsindustrie und die Gütegemeinschaft Verkehrsflächen aus Beton angeschlossen. Der Bundesminister hat diese Regelungen Anfang 2005 in einem Rundschreiben herausgegeben. Die Liste der Gesteinskörnungen, die nur nach Vorliegen eines Gutachtens eingesetzt werden dürfen, wurde um rezyklierte Gesteinskörnungen erweitert.

Um die genannten Schadensfälle und auch weitere Aspekte der Dauerhaftigkeit von Betondecken zu untersuchen und zu diskutieren, wurde in der Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) ein neuer Arbeitskreis gegründet. Zur Dauerhaftigkeit gehört nicht nur die Vermeidung einer schädigenden AKR, sondern auch die sorgfältige Herstellung und Nachbehandlung des Betons. Im

Arbeitskreis wird auch die Verwendung von CEM II- Zementen für den Straßenbau besprochen. Diese Zemente sind für den Straßenbau zugelassen, wurden aber bisher nur sehr selten eingesetzt. Eine Ad-hoc-Gruppe des VDZ Arbeitskreises Verkehrsbau erstellt zurzeit eine Zusammenstellung über die Erfahrungen mit CEM II- und CEM III-Zementen im Straßenbau. Darin einbezogen werden auch Untersuchungen des Forschungsinstituts zum Frost-Tausalz-Widerstand von Fahrbahndeckenbetonen unter Verwendung unterschiedlicher Portlandhüttenzemente (siehe Abschnitt Dauerhaftigkeit). Es wird empfohlen, dass hüttenandhaltige Zemente gegenüber den bislang verwendeten Zementen CEM II/B-S 32,5 R eine erhöhte Mahlfineinheit aufweisen und zukünftig als Zemente CEM II/B-S der Festigkeitsklasse 42,5 N zum Einsatz kommen sollten. Die höhere Mahlfineinheit und die schnellere Festigkeitsentwicklung vermindern die Neigung zum Wasserabsondern und verringern eine etwaige Nachbehandlungsempfindlichkeit.

Regelwerke

Insbesondere die Einführung der europäischen Normen erfordert eine Anpassung der Vorschriften im Straßenbau. Für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln – bisher in den ZTVT-StB geregelt – und den Bau von Betonfahrbahndecken – bisher in den ZTV Beton-StB geregelt – sind eine Reihe von europäischen Normen erschienen. Diese müssen in entsprechende nationale Vorschriften umgesetzt und in die Baupraxis eingeführt werden. Mit der Überarbeitung der bestehenden Regelwerke soll eine Zusammenführung der Regelungen für alle Schichten mit hydraulischen Bindemitteln zu einem Vorschriftenwerk einhergehen, das künftig neben Betondecken auch Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln umfasst. Das künftige Regelwerk, das unter Mitarbeit des FIZ erstellt wird, gliedert sich in drei Teile:

- TL Beton-StB für die Lieferung der Baustoffe und Baustoffgemische,
- ZTV Beton-StB für die Herstellung und
- TP Beton-StB mit technischen Prüfvorschriften für sämtliche Prüfungen an den Baustoffen und Baustoffgemischen und an der fertigen Leistung.

Neue Bauweisen

Im Forschungsprogramm „Leiser Straßenverkehr“ (Förderung BMBF, Koordination BAST) wurden unter Mitarbeit des FIZ neuartige offenporige Dränbetone in

Tafel V-3: Empfehlung des VDZ für den Alkaligehalt als Na₂O-Äquivalent (charakteristischer Wert) von Zementen für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton im Straßenbau

Zement	Hüttenandgehalt in M.-%	Alkaligehalt des Zements Na ₂ O-Äquivalent in M.-%	Alkaligehalt des Zements ohne Hüttenand bzw. Ölschiefer Na ₂ O-Äquivalent in M.-%
CEM I CEM II/A		≤ 0,80	-
CEM II/B-T		-	≤ 0,90
CEM II/B-S	21 bis 29	-	≤ 0,90
CEM II/B-S	30 bis 35	-	≤ 1,00
CEM III/A	36 bis 50	-	≤ 1,05



Bild V-34: Versuchsstrecke BAB A5 mit durchlaufend bewehrter Betondecke

Laboruntersuchungen optimiert und in einem Praxisversuch erprobt. Im September 2002 wurde eine rund 300 m lange Versuchsstrecke auf einer Bundesstraße angelegt. Der Dränbeton wurde in einer Schichtdicke von rund 8 cm sowohl auf einer Asphalt- als auch auf einer Betonunterlage eingebaut. Die Decke liegt seit 3 Wintern unter Verkehr. Lärmmessungen der BAST zeigen die akustische Gleichwertigkeit mit offenporigen Dränasphalten. Das Programm „Leiser Straßenverkehr“ wurde 2004 abgeschlossen. Zurzeit wird über eine Fortführung beraten.

Standardbauweise in Deutschland ist bisher die unbewehrte Betonfahrbahndecke mit verdübelten Querscheinfugen im Abstand von 5 m. In Nachbarländern werden abweichend hiervon zunehmend durchlaufend bewehrte Betondecken mit freier Rissbildung gebaut. Durch die Bewehrung bilden sich im Beton viele kleine, fein verteilte Risse, so dass auf das ansonsten übliche Schneiden von Querfugen verzichtet werden kann. Kosten für die Herstellung und Verdübelung der Fugen und die Aufwendungen für die Fugpflege während der Nutzungsdauer entfallen. Da in einigen Fällen insbesondere schlecht gepfleg-

te, undichte Fugen Ausgangspunkt von Schäden waren, erwarten die Fachleute von der neuen Bauweise eine verbesserte Dauerhaftigkeit. Um mit der durchlaufend bewehrten Betondecke auch in Deutschland Erfahrungen zu sammeln, wurde Ende 2004 eine Versuchsstrecke auf der BAB A5 angelegt (Bild V-34). Die Entwicklungen und Erfahrungen werden vom Arbeitskreis „Verkehrsbau“ des VDZ begleitet.

Eisenbahnoberbau – Feste Fahrbahn

Die hohen Anforderungen der Deutschen Bahn AG an die Lagestabilität der Gleise erfordern den Einsatz einer Festen Fahrbahn. Bei der 2002 in Betrieb genommenen Neubaustrecke Köln-Frankfurt wurden verschiedene Systeme eingesetzt. Beim System Rheda werden die Schwellen in einem vorher hergestellten Trog höhengenaueingemessen und mit einem Verfüllbeton monolithisch mit dem Trog verbunden. Bei der Bauart Züblin werden die Betonschwellen in einen Frischbeton eingerüttelt. Auf der Neubaustrecke Nürnberg-Ingolstadt wurde erstmals die Bauart System Bögl in großen Baulängen (rund 35 km) ausgeführt. Das System besteht aus im Fertigteilwerk hergestellten Betonplat-



Bild V-35: Feste Fahrbahn System Bögl: Höhengenaues Einmessen der Betonfertigteileplatten auf der hydraulisch gebundenen Tragschicht (HGT)

ten, die an der Einbaustelle auf eine hydraulisch gebundene Tragschicht aufgelegt werden (**Bild V-35**). Jede Platte ist mit insgesamt 10 Stützpunktpaaren (Schwellen) zur Schienenbefestigung ausgestattet. Nach dem höhengenauren Einmessen der Platten mit spindelbaren Vorrichtungen wird der Spalt zwischen Tragschicht und Platte mit einem bitumenmodifizierten Mörtel vergossen. Nach dem Untergießen werden die Fertigteileplatten in Längsrichtung mit Spannschlössern untereinander gekoppelt und die Querfugen mit Beton vergossen, so dass eine durchgehende Fahrbahn entsteht. Vorteile der Bauweise sind die hohe Lagegenauigkeit durch Vorfertigung und genaues Einmessen der Platten und die Möglichkeit des Auswechsels einzelner Platten im Havariefall. Die vielfältigen Entwicklungsarbeiten werden vom Arbeitskreis „Verkehrsbau“ des VDZ begleitet.

Brandschutz

Wohngebäude und Bauwerke, in denen sich Personen aufhalten, müssen so gebaut werden, dass die Menschen und ihr Hab und Gut sowie die Baulichkeiten vor den Auswirkungen von Bränden geschützt sind. Beton leistet einen wesentlichen Beitrag, um die notwendigen Schutzfunktionen zu verwirklichen. Beton brennt nicht. Daher bildet sich kein Rauch, und es werden keine giftigen Gase freigesetzt. Zudem widerstehen Bauteile aus Beton über relativ lange Zeit dem Feuer.

Diese brandschutztechnischen Eigenschaften lassen sich wirkungsvoll nutzen, um im Brandfall die Ausbreitung des Feuers zu behindern sowie die Tragfähigkeit der Konstruktion und damit den Bestand des Gebäudes zu erhalten. Dieser Nutzen dient

dem Personenschutz, weil den Menschen im Brandfall die Selbstrettung oder die Rettung durch die Feuerwehr in sicherer Art und Weise ermöglicht wird. Zudem dient er dem Sachschutz, weil die Feuerwehr die Möglichkeit einer effektiven Brandbekämpfung innerhalb des Gebäudes hat, die erfahrungsgemäß die Brandwirkung verringert. Bei Betonbauteilen, die einen hohen Feuerwiderstand aufweisen, überstehen die einzelnen Elemente einen Brand überwiegend schadensfrei, so dass das Gebäude dann weiter genutzt werden kann.

Brandschutzaktivitäten der Industrie

Im Gemeinschaftsausschuss „Feuerbeständigkeit“, der beim VDZ angesiedelt ist, und in dem die Beton- und Fertigteilindustrie, der Deutsche Beton- und Bautechnik-Verein, die Porenbetonindustrie und die Zementindustrie zusammenarbeiten, wurden die Schutzwirkungen bei Betongebäuden im Brandfall aufgelistet, die

- den Personenschutz,
- den Sachschutz für das einzelne Gebäude und die Nachbargebäude sowie
- den Umweltschutz im Brandfall

sicherstellen. Dieser Katalog steht zur Information von Planern, Bauherren und Nutzern zur Verfügung.

Darüber hinaus haben Arbeitskreismitglieder daran mitgewirkt, dass bei der zukünftig europaweit geltenden brandschutztechnischen Baustoffklassifizierung Beton als A1-Baustoff, d. h. als absolut nicht brennbar, ohne besonderen Nachweis, eingestuft ist (**Bild V-36**, links). Damit wurde der in Deutschland geltende Status auch europäisch festgeschrieben.

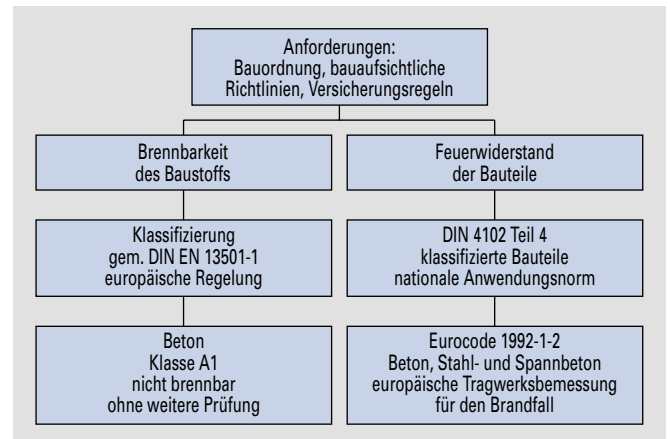


Bild V-36: Schema für die brandschutztechnischen Klassifizierungs- und Bemessungsregeln beim Übergang auf die europäischen Normen; derzeitiger Stand

Für die brandschutztechnische Bauteilklassifizierung wurde unter Mitarbeit der Beton- und der Zementindustrie eine Anpassung der bestehenden Bemessungsnorm DIN 4102 Teil 4 an die zukünftigen europäischen Regeln des Eurocode 1992-1-2 vorgenommen (im **Bild V-36** rechts). Mit den angepassten Regeln kann die Bauteildimensionierung im Hinblick auf die Feuerwiderstandsfähigkeit nach dem bewährten Prinzip von DIN 4102-4 vorgenommen werden. Ergänzt sind allgemein gültige Bemessungsregeln für Bauteile aus hochfestem Beton sowie für die Bereiche Mauerwerk aus Beton, haufwerksporiger Leichtbeton und bewehrter Porenbeton.

Sofern für Betonbauwerke eine Tragfähigkeitsbemessung nach dem zukünftigen europäischen Konzept gemäß Eurocode 2 auf der Grundlage von Teilsicherheitsbeiwerten erfolgen soll, kann die Brandschutz-Bemessung auch noch weiterhin nach DIN 4102-4 vorgenommen werden, denn es wurde eine nationale Anwendungsnorm erarbeitet, die für den Betonbau in praxiserrechter Form die Kombinierbarkeit von zukünftiger europäisch geltender Bemessung für den Normalzustand (Kaltbemessung) und gewohnter Bemessung für den Brandfall (Warmbemessung) nach DIN 4102-4 sicherstellt.

Mit dieser Entwicklung bei den Brandschutznormen kann die Praxis noch etwa 8 bis 10 Jahre lang für den Brandschutz bei Betongebäuden auf bewährte tabellarische Vorgaben z. B. für Mindestdichte, Mindestbreite und Anordnung der Bewehrung der Betonbauteile zurückgreifen.

Europäische Aktivitäten

Unter Leitung des CEMBUREAU arbeitet die Projektgruppe 2.2 „Fire safety with concrete“ an übergeordneten Brandschutzthemen, die für die europäischen Länder von Bedeutung sind. Die Projektgruppe ist ein von den europäischen Verbänden der Betonfertigteil- (BIBM), der Transportbeton- (ERMCO) und der Zementindustrie (CEMBUREAU) gebildetes Gremium. Bei der seit 4 Jahren laufenden Arbeit hat sich gezeigt, dass die den Betonbau berührenden Themen des baulichen Brandschutzes in den verschiedenen europäischen Ländern nahezu gleich gelagert sind. Einerseits muss auf dem Wege des technischen Marketings auf den hohen Stellenwert von Betonbauteilen für einen umfassenden baulichen Brandschutz hingewiesen werden, andererseits gilt es, die Position der Betonbauweise bei der Ausgestaltung und Umsetzung der europäischen Brandschutzvorschriften sachgerecht und angemessen zu vertreten.

So konnten aufgrund der Zusammenarbeit und Abstimmung in der Projektgruppe die ungerechtfertigt zu hoch festgelegten Wärmeindringkoeffizienten für Beton unter Brandbeanspruchung nach unten korrigiert werden. Die zeitabhängige Erwärmung von Betonquerschnitten bestimmt die Feuerwiderstandsdauer. Je schneller die Erwärmung erfolgt, desto geringer ist der Feuerwiderstand. In mehreren Ländern Europas haben Straßentunnel eine große Bedeutung. Es wurde ein Argumentationspapier erarbeitet, das die Vorteile von Betonfahrbahndecken bei Tunnelbränden aufzeigt.

Mit einer Broschüre zum Brandschutz mit Beton als grundlegende Information für die Praxis soll die Arbeit der CEMBUREAU-Projektgruppe in 2005 abgeschlossen werden.

Modellierung ■

Die Vorhersage der Zement- und insbesondere der Betoneigenschaften ermöglicht für den Anwender eine schnelle zielorientierte Auswahl der Ausgangsstoffe insbesondere des Zements für den jeweiligen Beton. In zunehmendem Maße werden hierzu mathematische Modelle entwickelt, mit denen aufgrund der chemischen Zusammensetzung der Zemente deren Leistungsfähigkeit beurteilt werden kann. Die Erweiterung dieser Modelle für die Beurteilung der Betoneigenschaften setzt voraus, dass auch die Eigenschaften der übrigen Ausgangsstoffe genau genug beschrieben werden können.

Simulation der Zementhydratation

Voraussetzung für die rechnerische Simulation der Zementhydratation ist ein hinreichend genaues Hydratationsmodell. Um die Umsetzung eines solchen Modells in ein rechnerisches Simulationsmodell zu ermöglichen, sind Annahmen und Vereinfachungen zu treffen. Dabei sind Betrachtungen hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung und der räumlichen Änderung im Gefüge anzustellen. Voraussetzungen dafür sind eine zutreffende Wahl der Materialausgangsparemeter und ein ausreichende diskretisierte mathematische Simulation der chemisch-mineralogischen Wechselwirkungen. Dazu gehören die experimentelle Bestimmung der Materialparameter, wie zum Beispiel Reaktivität und Dichte.

Einfache Modelle zur Simulation der Zementhydratation können den vielschichtigen chemisch-mineralogischen Vorgängen nicht gerecht werden. Erst durch die Entwicklungen im Bereich der Soft- und Hardware ist es seit einigen Jahren möglich, entsprechend komplexe mathematische Modelle für den Baustoff Zement rechnerisch zu bewältigen. Mit Hilfe computergestützter Modelle werden die Zementhydratation und die Gefügeentwicklung simuliert und darauf basierend Mörtel- und Betoneigenschaften vorhergesagt.

Grundlegende Modellierungsarbeiten auf dem Gebiet der Zementeigenschaften wurden am National Institute of Standards and Technology (NIST) in den USA geleistet. Der Verein Deutscher Zementwerke e.V. ist zurzeit als einziger deutscher Partner an den aktuellen Arbeiten im Rahmen eines internationalen Konsortiums zur Entwicklung eines virtuellen Prüflabors (Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory, VCCTL) beteiligt.

Modellierung der Zementhydratation

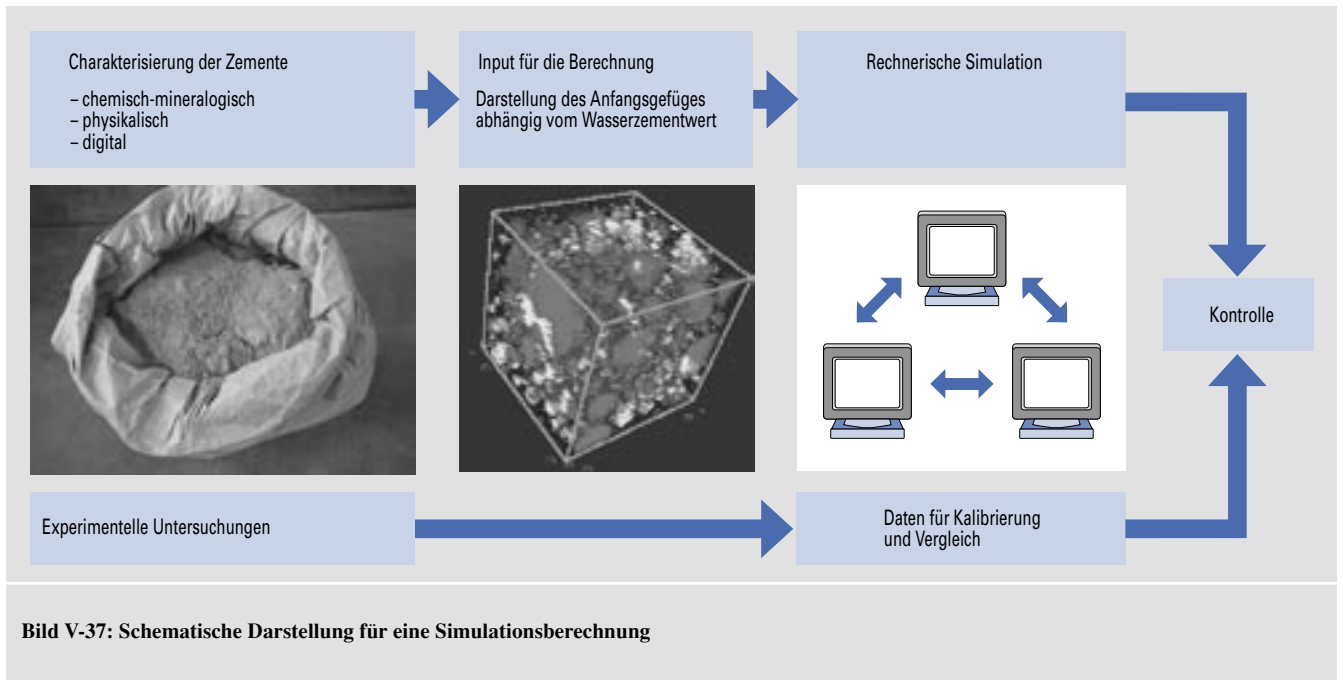
Grundlegende Arbeiten zur Modellierung der Zementhydratation mit Hilfe „zellulärer Automaten“ werden am NIST seit Anfang der 90er Jahre geleistet. Es handelt sich um ein dreidimensionales Modell, mit dem die Entwicklung der Hydratphasen und des Zementsteingefüges in einem Quader mit der Kantenlänge von 100 µm beschrieben wird. Hierzu wird der Quader in Elementarzellen mit einer Kantenlänge von 1 µm unterteilt, den so genannten „Voxeln“. Dieser Quader wird zunächst mit Zementpartikeln – unter Berücksichtigung ihrer Korngrößenverteilung und Phasenverteilung – sowie mit Wasser gefüllt. Die chemischen Reaktionen im Modell umfassen neben den Hydratationsreaktionen die Vorgänge zur

Lösung und Keimbildung der Feststoffe. Sie führen schrittweise zu einer Veränderung der stofflichen Zusammensetzung von Feststoff und Porenlösung sowie des Gefüges, wobei auch Lagerungsbedingungen berücksichtigt werden können. Bei jedem Iterationsschritt lösen sich Zementteilchen (Voxel), die sich in Kontakt mit dem Wasser des Kapillarporenraums befinden, und bewegen sich durch den Porenraum. Treffen sie dabei auf einen geeigneten Reaktionspartner, können sie reagieren und neue Phasen bilden. Der teilweise hydratisierte Zementstein besteht damit im Wesentlichen aus 4 Phasen: Unreagierter Zement, Kapillarporenwasser, CSH-Gel und Calciumhydroxid. Die Volumenanteile der jeweiligen Phasen werden analysiert, so dass sich die Porenstruktur errechnen lässt. Auswertungen über den Fortschritt der Hydratation betreffen die physikalischen Eigenschaften des Gefüges (Festigkeitsentwicklung, Porosität, Transporteigenschaften, Vernetzungsgrad der Reaktionsprodukte), die räumliche chemische Zusammensetzung sowie das chemische Schwinden und die Temperaturentwicklung.

Dieses zelluläre Modell erlaubt ferner die Betrachtung von Hüttensand, Kalkstein, Flugasche und Silicastaub, für die Reaktivitätsparameter in Abhängigkeit von der mineralogischen und chemischen Zusammensetzung eingeführt werden. Aus dem errechneten Hydratationsgrad ergibt sich nach Powers die Druckfestigkeit für den jeweiligen Zement. Zukünftig werden hierzu Finite-Elemente-Methoden eingesetzt, die auf den Elastizitätsmodul der einzelnen Phasen zurückgreifen.

Berechnungen mit dem NIST-Modell beruhen auf einem Netzwerk von Hydratationsreaktionen unterschiedlichen Umfangs und verschiedener Komplexität. Das Modell benötigt zunächst eine vollständige Charakterisierung des Zements als Input-Parameter, um die Berechnung durchführen zu können. Für die Kalibrierung und Validierung des Modells wird die rechnerische Simulation von experimentellen Untersuchungen zu den ausgewählten Zementen begleitet. Sie betreffen im Wesentlichen Untersuchungen zur Hydratation und Festigkeitsentwicklung. **Bild V-37** zeigt schematisch den Ablauf für eine Simulationsberechnung.

Die Modellierung der Zementhydratation mit dem NIST-Modell bietet die Möglichkeit, rechnerisch zur Lösung praxisrelevanter Fragen der Leistungsfähigkeit von Zement und Beton beizutragen. Veränderungen der Klinkerzusammensetzung



Tafel V-4: Charakterisierung des Zements

Chemisch-mineralogische Charakterisierung		
Phasen des Klinkers (C ₂ S, C ₃ S, C ₃ A, C ₄ AF)	Gesamt in V.-%	Rietveld-Verfahren, etc.
Alkalien (Na ₂ O, K ₂ O)	Gesamt in M.-% Löslich in M.-%	Röntgenfluoreszenzanalyse ASTM C 114
Sulfate (Gesamt, Halbhydrat, Anhydrit)	Gesamt in V.-%	Rietveld-Verfahren Wärmestrom-Kalorimetrie (DSC)
Physikalische Charakterisierung		
Mahlfeinheit	Spezifische Oberfläche (Blaine-Wert)	Massebezogene Oberfläche durch Luftdurchlässigkeitsverfahren
Korngrößenverteilung	Korngrößenfraktion	Siebanalyse und Annäherung durch RRSB-Verteilung
Digitale Charakterisierung		
Bildanalyse	Phasenverteilung	Digitale Bildauswertung mit REM und Elektronenmikroskopanalyse mittels EDX
Stereometrische Parameter	Oberfläche, Umfang	

Charakterisierung der Zemente

Grundbestandteil des NIST-Modells ist die Darstellung der Partikelverteilung vor Beginn der Hydratation. Zur Charakterisierung der Zemente sind dafür sowohl Daten zur chemischen und mineralogischen Zusammensetzung und zu den physikalischen Eigenschaften des Zements als auch digitalisierte mikroskopische Bildaufnahmen des Zements notwendig. Ein wesentlicher Parameter, der sich aus der digitalen Charakterisierung ergibt, ist der Oberflächenanteil der Zementbestandteile. Dieser kann von den entsprechenden Volumen- bzw. Masseanteilen abweichen und hat daher maßgeblichen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der Hydratation, da die an der Oberfläche eines Zementteilchens liegenden Bestandteile schneller mit Wasser in Berührung kommen als diejenigen im Kern. **Tafel V-4** gibt einen zusammenfassenden Überblick über die notwendigen Parameter zur Charakterisierung des Zements als Grundlage für die rechnerische Simulation der Zementhydratation und mögliche experimentelle Bestimmungsmethoden.

Bild V-38 zeigt die Schritte, durch die das Anfangsgefüge des rechnerischen Elements modelliert wird. Auf der Basis dieses Elements erfolgt die weitere rechnerische Simulation der Zementhydratation. Eine statistische Auswertung von Klinkerphasen und Gips sowie der weiteren Hauptbestandteile ermöglicht vor Beginn der Simulationsrechnung den Vergleich zwischen experimentellen Daten und numerischer Auswertung bzw. deren Kontrolle.

durch Abweichungen z. B. bei der Führung des Zementdrehofens oder in der Korngrößenverteilung der Zementhauptbestandteile können unmittelbar in ihren Auswirkungen auf die Festigkeitsentwicklung der Zemente vorhergesagt werden.

Das Forschungsinstitut der Zementindustrie befasst sich zurzeit mit der Modellierung der Zementhydratation mit dem vorrangigen Ziel, die 28-Tage-Normdruckfestigkeit von Zementen bereits nach kurzer Zeit vorhersagen zu können. Die mathematische Modellierung soll langfristig die kostengünstige und zeitnahe rechnerische Ermittlung der Eigenschaften der Zemente und der daraus herzustellenden Mörtel und Betone ermöglichen.

Es ist durchaus vorstellbar, dass leistungsfähige Modelle zur Zementhydratation künftig ihren festen Platz bei der Normprüfung von Zementen finden und eine vollautomatische Online-Produktion von Zement mit integrierter Qualitätssicherung ermöglichen. Die Ergebnisse wären dann direkt bei der Produktionskontrolle und bei der Betonherstellung verwendbar. Darüber hinaus bietet die virtuelle Prüfung die Möglichkeit, eine große Anzahl an Parametern zum Zweck der Entwicklung neuer und Optimierung existierender Materialien mit vergleichbar geringem Versuchsaufwand zu untersuchen.

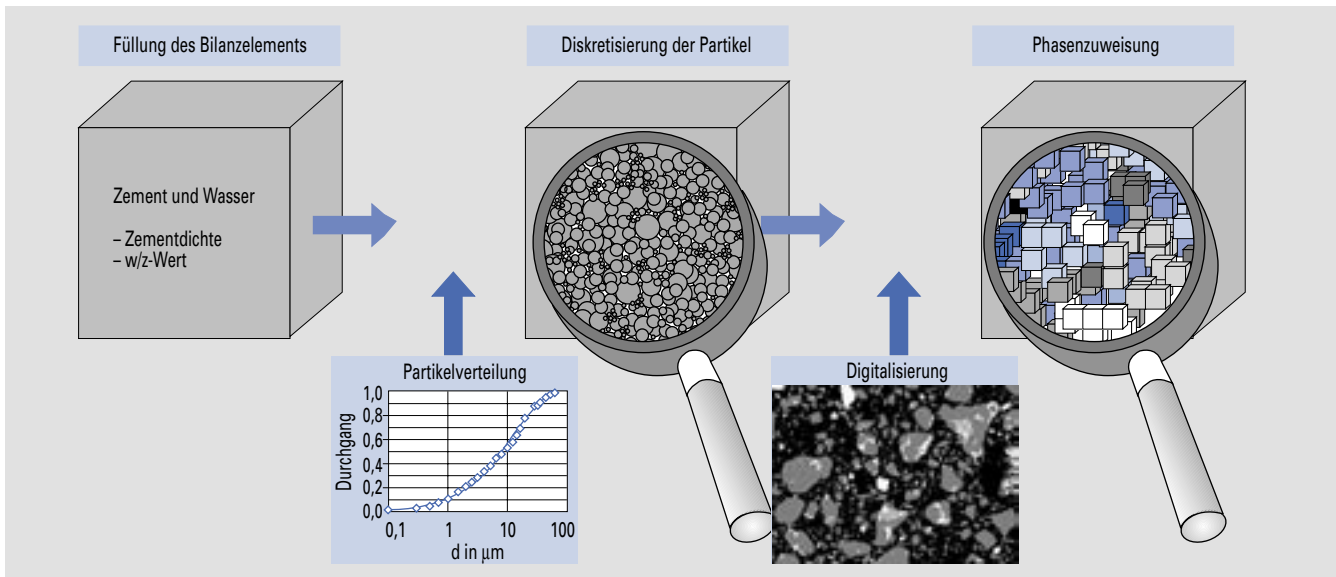


Bild V-38: Füllung des Bilanzelements für die Simulation mit dem NIST-Modell

Simulationsergebnisse

Beispielhaft zeigt **Bild V-39** zu ausgewählten Zeitpunkten die Gefügeentwicklung eines Zementsteins unter Verwendung eines Portlandzements CEM I mit einem Wasserzementwert von 0,50. Die Ausgangssituation ($t = 0$) berücksichtigt die Korngrößenverteilung des Zements. Die einzelnen Klinkerphasen wurden quantitativ ermittelt und nach bildanalytischer Auswertung des Klinkers auf die einzelnen Kornfraktionen aufgeteilt. Der Hydratationsprozess zeigt deutlich die Auflösung der Zementpartikel und die zunehmende Ausbildung eines Mikrogefüges.

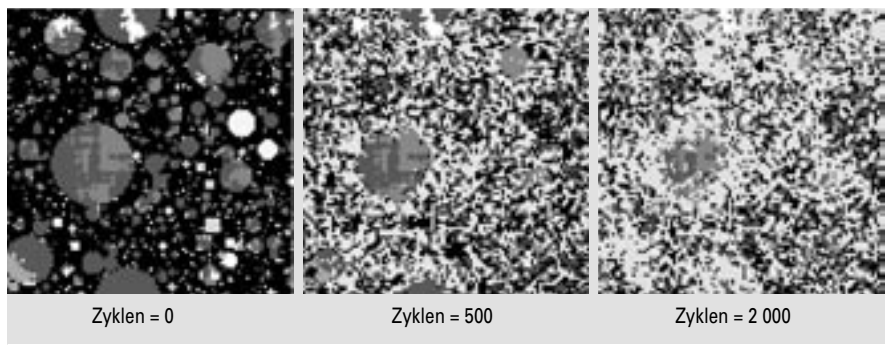


Bild V-39: Gefügeentwicklung im Zementstein infolge des Hydratationsprozesses

Die Simulationsberechnung liefert als Ergebnis unter anderem den Hydrationsgrad sowie die Entwicklung der Volumenanteile der Hydratprodukte bzw. den Abbau der einzelnen Zementklinkerphasen. **Bild V-40** zeigt exemplarisch in Abhängigkeit von der Anzahl der Berechnungszyklen die zeitliche Entwicklung des Hydrationsgrades und der Porosität sowie der Volumenanteile an CSH, CH, Gips und Ettringit. Empirische Zusammenhänge, die den Alkaligehalt beinhalten, ermöglichen die Darstellung der zeitabhängigen Hydratation in Abhängigkeit von den Berechnungszyklen. Darüber hinaus liefert die rechnerische Simulation der Zementhydratation Ergebnisse zur zeitlichen Entwicklung des pH-Werts der Porenlösung und der Hydratationswärme.

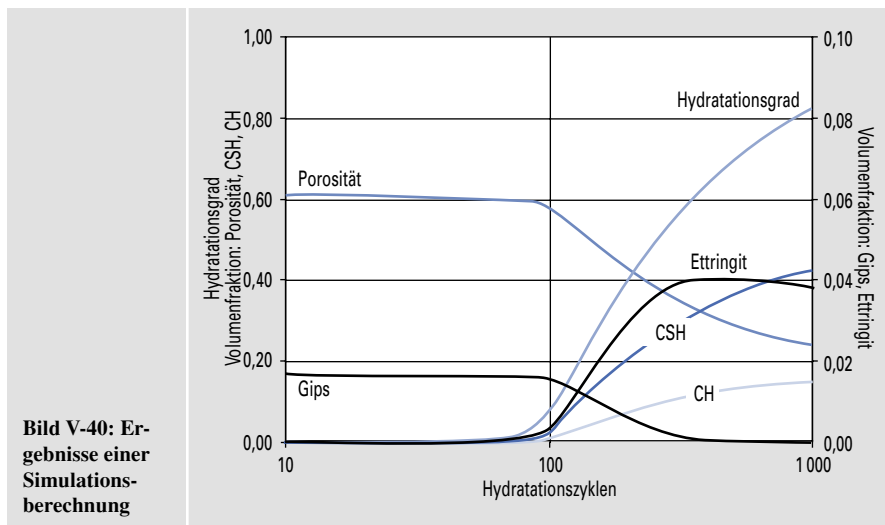
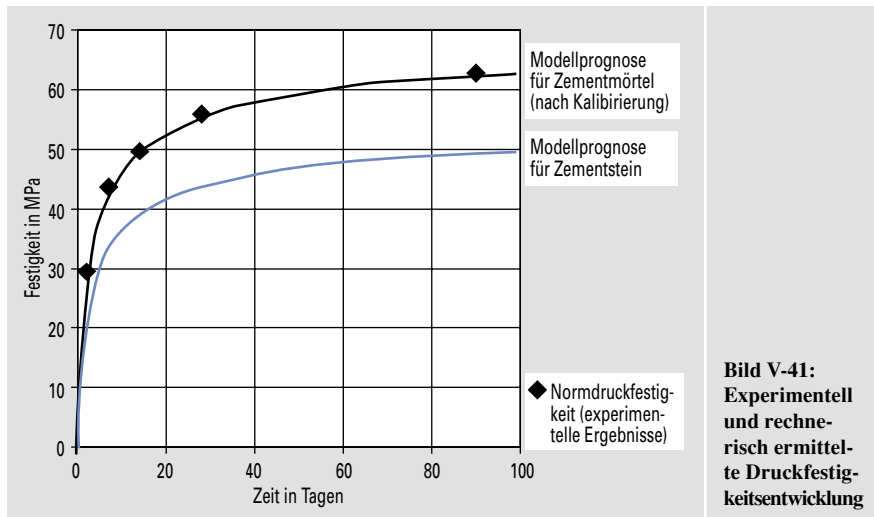


Bild V-40: Ergebnisse einer Simulationsberechnung



Darüber hinaus wurde festgestellt, dass die neuen Betonnormen die Besonderheiten von massigen Bauteilen nicht mit abdecken. Diese Punkte werden in einer Richtlinie des DAfStb behandelt, die im Verlauf des Jahres 2004 parallel zur A1-Änderung erarbeitet wurde. Mitarbeiter des Forschungsinstituts waren intensiv an der Erarbeitung der Normergänzung und der Richtlinie beteiligt.

Anwendungsregeln für Zement

In der A1-Änderung wird die Anwendung folgender Zemente geregelt:

- Normalzement mit niedriger Hydrationswärme nach DIN EN 197-1/A1 (LH-Zement)
- Hochofenzement mit niedriger Hydrationswärme nach DIN EN 197-4 (CEM III/L)
- Zemente mit sehr niedriger Hydrationswärme nach DIN EN 14216 (VLH)
- Normalzement mit besonderen Eigenschaften nach DIN 1164-10 (HS- und NA-Zement)
- Zement mit verkürztem Erstarren nach DIN 1164-11 (FE- und SE-Zement)
- Zement mit einem erhöhten Anteil an organischen Bestandteilen nach DIN 1164-12 (HO-Zement)

Bezüglich der Anwendung der Zemente nach diesen Normen wurden mit der A1-Änderung folgende Regelungen getroffen: VLH-Zemente mit der Zusammensetzung eines CEM III/B dürfen wie CEM III/C verwendet werden. CEM I- und CEM II-Zemente können als SE-Zemente (Spritzbetonzemente) eingesetzt werden. Für alle übrigen Zemente der o. g. Normen gelten die Anwendungsregeln der DIN 1045-2.

Anrechnungsregeln für Flugasche

Die bisherigen Regelungen für die Anrechnung von Flugasche und Silicastaub wurden aus der Flugasche-Richtlinie sowie aus den bauaufsichtlichen Zulassungen für Silicastaub in die neue Betonnorm DIN 1045-2 übernommen. Sie sind auf einige der schon in der früheren DIN 1164 enthaltenen Zemente begrenzt. Eine Überarbeitung dieser Regelung war erforderlich, um die jetzt von einigen Zementwerken hergestellten „neuen“ Zemente nach DIN EN 197-1 (siehe auch Abschnitt „Portlandkompositzemente“) nicht zu benachteiligen. Flugasche kann als Betonzusatzstoff mit einer angenommenen zementäquivalenten Wirkung von 40 % ($k = 0,40$) auf den Wassermengewert angerechnet werden. Hierbei darf die anzurechnende Menge 33 % des Zementgehalts nicht überschreiten ($f/z =$

Rechnerische Ermittlung der Druckfestigkeit

Maßgebend für die Druckfestigkeit des Zementsteins ist in erster Linie die Kapillarporosität, die im Wesentlichen vom Hydrationsgrad abhängig ist und unter Anwendung verschiedener Modelle empirisch ermittelt werden kann. Bei der Berechnung der Festigkeit kann zunächst im NIST-Modell die Gleichung nach Powers eingesetzt werden, in der die Kapillarporosität auf das Volumen der Hydrationsprodukte bezogen wird. Dabei wird von einer Grundfestigkeit ausgegangen, die durch die Porosität abgemindert wird und der Festigkeit eines porenfreien Gefüges entspricht. Somit ist es für die Festigkeit des Zementsteins ohne Bedeutung, ob die Kapillarporosität auf einem höheren Anteil an nicht hydratisiertem Zement, das heißt auf einem verminderten Hydrationsgrad, oder auf einer geringeren Kapillarporosität des hydratisierten Zements beruht. Eine Übertragung der Zementsteinfestigkeit auf die Normdruckfestigkeit ist daher nur begrenzt möglich. Einflüsse der Gesteinskörnung und der Reaktivität in Abhängigkeit von Wasser/Zement-Wert, Kornform und -verteilung von Zusatzstoffen und Feinstoffen müssen ergänzend betrachtet werden.

Mit dem NIST-Modell ist es möglich, Reaktionspotentiale zur Bildung feinkristalliner Reaktionsprodukte, Oberflächenreaktionen sowie die Porosität der Matrix zu berücksichtigen. Das Modell erlaubt es, granulometrische Einflüsse der inerten und reaktiven Stoffe in die Berechnung einzubeziehen. Der Einfluss des Sandes ist zurzeit noch nicht implementiert. Veränderungen der Porosität in der Kontaktzone in Abhängigkeit der gebildeten Hydratprodukte sind rechnerisch möglich. Die

Verformungseigenschaften des Zementsteins in Abhängigkeit von der Steifigkeit der hydratisierten und nicht hydratisierten Anteile werden durch Finite-Elemente-Berechnungen ermittelt. Damit ist es möglich, den E-Modul des Zementsteins zu bestimmen und dessen Abhängigkeit von anderen Zementeigenschaften vorherzusagen. Inwieweit diese Ergebnisse auf die Normdruckfestigkeit übertragen werden können, wird im Rahmen eines Forschungsvorhabens untersucht. Beispielhaft zeigt Bild V-41 die rechnerisch ermittelte Druckfestigkeit eines Zementsteins in Abhängigkeit vom Alter. Für Zementmörtel weicht die experimentell ermittelte Druckfestigkeit aufgrund der Gesteinskörnungsanteile naturgemäß ab. Eine Kalibrierung der Kurven ist jedoch möglich und erlaubt somit auch eine Prognose der Zementnormdruckfestigkeit.

Normung

Die neuen Betonnormen DIN EN 206-1 und DIN 1045 wurden im August 2002 bauaufsichtlich eingeführt. Um das Normpaket zum Ende der Übergangsfrist am 31.12.2004 technisch und formal auf den neuesten Stand zu bringen, wurde eine A1-Änderung zu DIN 1045-2 erarbeitet. Diese Normergänzung wurde notwendig, um folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Aufnahme des Anrechnungskonzepts für Flugasche in Kombination mit CEM II-M-Zementen,
- Änderungen, die sich aus den neuen nationalen oder europäischen Produktnormen für Zement, Betonzusatzmittel und Gesteinskörnungen ergeben,
- Einarbeitung der Berichtigungsblätter zu DIN 1045-2.

0,33). Für CEM II-M-Zemente, die keine Puzzolane enthalten, wurde die o. g. Regelung übernommen. Bei CEM II-M-Zementen mit bis zu 20 M.-% Puzzolanen darf die maximale Menge der zusätzlich zugegebenen Flugasche 25 % des Zementgehalts ($f/z = 0,25$) nicht überschreiten. Dabei ist die Anrechnung der Flugasche mit den Zementen CEM II/A-V und CEM II/A-M (P-V) in Beton für die Expositionsklasse XF3 (Frostangriff bei hoher Wassersättigung) ausgeschlossen. Die bisherige Regelung, dass bei Frost-Tausalz-Angriff (Expositionsklassen XF2, XF4) keine Flugasche angerechnet werden darf, bleibt bestehen. **Tafel V-5** gibt einen Überblick über die neuen Regelungen und zeigt, für welche Zemente nun zusätzlich eine Anrechnung von Flugasche ermöglicht wurde. Zur Sicherstellung der Alkalitätsreserve der Porenlösung bei Verwendung von Flugasche und Silicastaub wurden entsprechende Regelungen getroffen. So ist aus diesem Grund bei Zementen, die Silicastaub enthalten (z. B. CEM II/A-M (D-LL), CEM II/B-M (S-D)), die Flugaschezugabe auf $f/z \leq 0,15$ begrenzt. Bei Zementen CEM II/A-M (S-T, S-LL, T-LL) ist die maximal zulässige Menge an Flugasche bei gemeinsamer Verwendung von Flugasche und Silicastaub auf $f/z \leq (0,15 - s/z) \cdot 3$ begrenzt. Bei allen weiteren Zementen der **Tafel V-5** ist die gemeinsame Verwendung von Flugasche und Silicastaub nicht zulässig.

CEM II-M-Zemente für Beton mit hohem Sulfatwiderstand

Wie bei den Anrechnungsregeln für Flugasche, so war auch die „Flugascheregelung“ für Beton mit hohem Sulfatwiderstand um „neue“ Zemente zu ergänzen. Bei einem Sulfatgehalt des angreifenden Wassers $SO_4^{2-} \leq 1\,500\text{ mg/l}$ dürfen zur Herstellung von Beton mit hohem Sulfatwiderstand nun auch Mischungen aus Zement und 20 % Flugasche unter Verwendung von Flugaschezement CEM II/A-V, Portlandkompositzement CEM II/A-M mit den Hauptbestandteilen S, V, T, LL oder CEM II/B-M (S-T) verwendet werden.

Gesteinskörnungen

Seit 01. 06. 2004 werden die Eigenschaften von Gesteinskörnungen für Normalbeton durch DIN EN 12620 (Gesteinskörnungen für Beton) in Verbindung mit der nationalen Anwendungsnorm DIN V 20000-103 geregelt. Die Eigenschaften von leichten Gesteinskörnungen sind in DIN EN 13055-1 festgeschrieben. Die zugehörige Anwendungsnorm ist DIN V 20000-104. Die entsprechenden Normenbezüge, die bisher auf die Normenreihe der DIN 4226 abgestellt waren, mussten daher angepasst

Tafel V-5: Erweiterung der Anwendungsregeln für Flugasche und Silicastaub nach DIN 1045-2/A1

Portlandkompositzement	Anrechnung			max. anrechenbare Flugaschemenge f/z	max. Silicastaubgehalt s/z	keine Anrechnung bei Expositionsklassen
	f	s	f+s			
CEM II/A-M (S-T, S-LL, T-LL)	x	x	x ¹⁾	0,33	0,11	XF2, XF4
CEM II/B-M (S-T)						
CEM II/A-M (S-D, D-T, D-P, D-V, D-LL)	x	-	-	0,15 ³⁾	-	
CEM II/B-M (S-D, D-T)						
CEM II/A-M (S-P, P-T, P-LL)	x	x	-	0,25	0,11	
CEM II/A-M (S-V, V-T, V-LL)	x	x ²⁾	-			
CEM II/A-P	x	x ²⁾	-			XF2, XF4 und XF3
CEM II/A-V, CEM II/A-M (P-V)	x	x ²⁾	-			

Anrechnung von Flugasche und Silicastaub auf den äquivalenten Wasserzementwert:

$$(w/z)_{eq} = \frac{w}{z + k_f \cdot f_{anrech.} + k_s \cdot s}$$

¹⁾ bei gemeinsamer Verwendung:
 $f/z \leq (0,15 - s/z) \times 3$
²⁾ bei CEM II/A-P und CEM II/A-V nach DIN 1045-2 bereits zulässig
³⁾ keine Flugaschezugabe über $f/z = 0,15$ hinaus

werden. Darüber hinaus ergaben sich keine grundlegenden technischen Veränderungen. Die Anforderung an den Verschleißwiderstand der Gesteinskörnungen wurde in DIN 1045-2 gestrichen, da eine Überprüfung nicht möglich ist und da vor allem der Zementstein derjenige Bestandteil ist, der einer Verschleißbeanspruchung unterliegt.

Betonzusatzmittel

Wie für die Gesteinskörnungen wurde auch für die Betonzusatzmittel eine harmonisierte europäische Produktnorm, die DIN EN 934-2, fertig gestellt. Bisher benötigten Betonzusatzmittel für die Verwendung in bauaufsichtlich relevanten Bereichen eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt). Seit dem 01. 05. 2003 müssen alle Zusatzmittel, die in den Geltungsbereich der harmonisierten europäischen Norm EN 934 fallen, das CE-Zeichen tragen und die damit verbundenen Anforderungen erfüllen. Die bisher in Deutschland in den Zulassungs- und Überwachungsgrundsätzen für Betonzusatzmittel des DIBt getroffenen Festlegungen im Hinblick auf bestimmte Anwendungen und der Nachweis der Unschädlichkeit in Bezug auf eine korrosionsfördernde Wirkung für den eingebetteten Stahl bzw. die Spannglieder wurden in den Normen DIN V 18998 „Beurteilung des Korrosionsverhaltens von Zusatzmitteln“ und DIN V 20000-100 getroffen. Zusatzmittel für Einpressmörtel für Spannglieder

werden in DIN EN 934-4 in Verbindung mit DIN V 20000-101 behandelt.

Richtlinien des DAfStb

Richtlinien des DAfStb werden dann erarbeitet, wenn z. B. auf europäischer Ebene kein Normungsverfahren zustande kommt oder wenn eine schnelle Umsetzung von Forschungsergebnissen in die Praxis gewünscht wird. Auch in diesem Berichtszeitraum waren die Mitarbeiter des Forschungsinstituts intensiv an der Bearbeitung der unterschiedlichsten Richtlinien des DAfStb beteiligt.

Abgeschlossen wurde im Berichtszeitraum die Bearbeitung der Richtlinien

- Massige Bauteile aus Beton
- Selbstverdichtender Beton
- Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen
- Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton
- Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen

Massige Bauteile aus Beton

Die Richtlinie gilt für massige Bauteile aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, bei denen aufgrund großer Abmessungen eine erhöhte Bauteilerwärmung infolge Hydratation auftritt. Die Regelungen gelten für Bauteile, deren kleinste Bauteilabmessung mindestens 0,80 m beträgt, und bei denen Zwang und Eigenspannungen in besonderer Weise zu berücksichtigen sind.

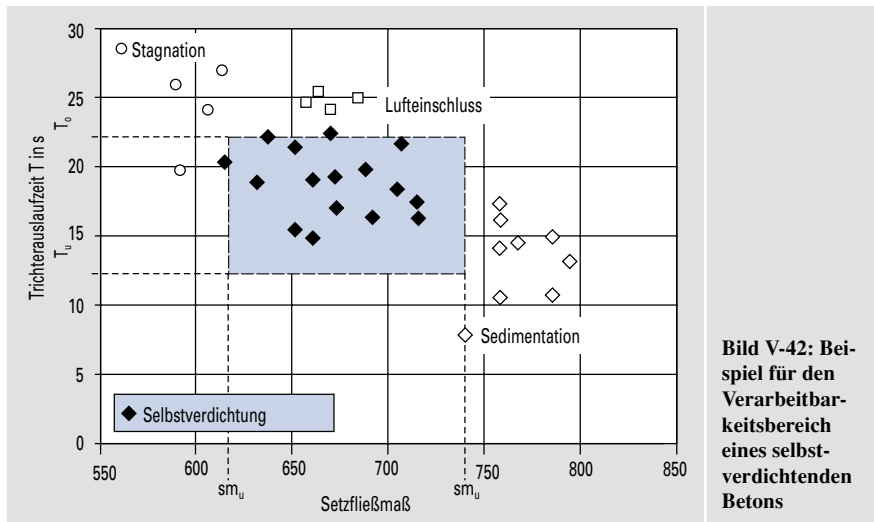


Bild V-42: Beispiel für den Verarbeitbarkeitsbereich eines selbstverdichtenden Betons

DIN 1045-2 enthielt mit der Fußnote b in Tabelle F.2.1 für massive Bauteile mit der kleinsten Bauteilabmessung von 80 cm in den Expositionsklassen XD/S 2 und XD/S 3 bereits die Möglichkeit, den Mindestzementgehalt um 20 kg/m^3 von 320 auf 300 kg/m^3 zu senken. Die Reduzierung des Zementgehalts verfolgt das Ziel der Verminderung der Hydratationswärme und der damit verknüpften Zwang- und Eigenspannungen. Die Reduzierung des Mindestzementgehalts von 320 auf 300 kg/m^3 wurde in der Richtlinie nun auch für die Expositionsklassen XF2, XF3, XF4 und XA2 zugelassen. Die Reduzierung des Zementgehalts in den verschiedenen Expositionsklassen zugunsten der Hydratationswärmeminimierung wurde unter Dauerhaftigkeitsaspekten bei massigen Bauteilen als unkritisch eingestuft, leistet aber einen merklichen Beitrag zur Reduzierung des Temperaturanstiegs.

Vor dem gleichen Hintergrund erfolgte die Reduzierung des Mindestzementgehalts bei Anrechnung von Zusatzstoffen von 270 auf 240 kg/m^3 in der Expositionsklasse XA1. Schließlich wurde die Erhöhung des höchstzulässigen w/z-Wertes von $0,45$ auf $0,50$ bei XS3 und XD3 und die damit einhergehende Veränderung der Mindestdruckfestigkeitsklasse für erforderlich gehalten, um eine ausreichende Verarbeitbarkeit von Massenbetonen auch ohne unverhältnismäßig hohe Zugabe von Betonzusatzmitteln sicherzustellen. Die mit der Veränderung des höchstzulässigen w/z-Werts verbundene Erhöhung des Kappillarporenanteils im Zementstein und der daraus resultierende geringere Chlorideindringwiderstand mussten in diesem Fall allerdings kompensiert werden. Dies soll durch eine Beschränkung dieser Regelung auf Betone mit CEM II/B-V, CEM III/A,

CEM III/B oder Kombinationen von Zementen und Flugasche als Betonzusatzstoff geschehen. Man geht davon aus, dass diese Zemente und Zement/Zusatzstoff-Kombinationen – eine ausreichende Nachbehandlung des Betons vorausgesetzt – zu einer Erhöhung des Chlorideindringwiderstandes beitragen.

Selbstverdichtender Beton

Die im Frühjahr 2002 veröffentlichte DAfStb-Richtlinie „Selbstverdichtender Beton (SVB)“ wurde an das neue Normenwerk angepasst. Mit der Ausgabe November 2003 liegt nunmehr die überarbeitete, aus 3 Teilen bestehende Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“ vor. Die Richtlinie enthält Änderungen und Ergänzungen zum neuen Normenwerk, die sich auf Bemessung und Konstruktion, Beton sowie Bauausführung beziehen.

In die Überarbeitung der Richtlinie sind die bisherigen Erfahrungen aus den Zulassungsverfahren eingeflossen. Ferner wurden zusätzliche detaillierte Qualitätssicherungsmaßnahmen aufgenommen. Hierzu zählt insbesondere die im FIZ erarbeitete „Fensterlösung“ für SVB. Sie ermöglicht dem Hersteller von selbstverdichtendem Beton, die Verarbeitbarkeits-eigenschaften seines SVB in Frisch- und Festbetonuntersuchungen zu ermitteln und in der Erstprüfung zu belegen. Der Hersteller sichert die Eigenschaft „Selbstverdichtung“ zu und gibt die Zielwerte und zulässigen Abweichungen für das Setzfließmaß und die Trichterauslaufzeit an. Die Grenzen des Fensters müssen in der laufenden Produktion durch die Eigenüberwachung kontinuierlich überprüft werden, da sie sich durch Schwankungen der Ausgangsstoffe verändern können.

Die im Frühjahr 2004 veröffentlichte Richtlinie wurde mit Aufnahme in die Bauregelleiste bauaufsichtlich eingeführt.

Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen

Die DAfStb-Richtlinie „Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen“ liegt nunmehr einschließlich der Erläuterungen in der Ausgabe Dezember 2004 vor.

Im vorliegenden Teil 1 der Richtlinie wird der Anteil der rezyklierten Gesteinskörnung am gesamten Gesteinskörnungsvolumen des Betons begrenzt. Dieser Anteil ist von der Zusammensetzung der rezyklierten Gesteinskörnung, also dem Liefertyp, abhängig. Im Teil 1 der Richtlinie ist die Verwendung der Gesteinskörnungstypen 1 und 2 nach DIN 4226-100 geregelt. Bei Typ 1 handelt es sich um reinen Betonsplitt bzw. Betonbrechsand. Rezyklierte Gesteinskörnungen des Typs 2 können neben Beton und natürlicher Gesteinskörnung bis zu 30 M.-% nicht porosierte Ziegel und Kalksandsteine enthalten. Die zulässigen Anteile $> 2 \text{ mm}$ im Beton sind, in Abhängigkeit vom Anwendungsbereich, auf maximal 45 Vol.-% für Typ 1 und 35 Vol.-% für Typ 2 begrenzt. Rezyklierte Gesteinskörnung $\leq 2 \text{ mm}$ darf nicht verwendet werden. Die Bemessung erfolgt analog der Bemessung für Normalbeton nach DIN 1045-1.

Die weitere Arbeit des DAfStb-Unterausschusses „Beton mit rezyklierten Zuschlägen“ konzentriert sich nun auf den zweiten Teil der Richtlinie, bei dem der Anteil der rezyklierten Gesteinskörnung $> 2 \text{ mm}$ bis zu 100 % betragen darf. Rezyklierte Gesteinskörnungen $\leq 2 \text{ mm}$ sollen auch in diesem Fall von der Verwendung ausgeschlossen bleiben. Für die veränderten Betoneigenschaften wird ein neues Bemessungskonzept erarbeitet.

Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton

Die Anwendung von wasserundurchlässigem Beton wurde durch eine neue Richtlinie des DAfStb geregelt. Damit ist eine Lücke im Regelwerk der Bauwerksabdichtungen nach DIN 18195 geschlossen worden, die sich im Wettbewerb häufig als Nachteil für die Betonbauweise auswirkte. Die Richtlinie „Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton“ regelt Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit dieser Bauwerke, für die es bisher keine Festlegungen gab. Sie gilt für Betonbauteile, die ganz oder teilweise im Erdreich liegen und bei denen der Beton sowohl die tragende als auch die abdichtende Funktion übernimmt. Da hierbei auf aufwendige äußere Abdich-

tungsmaßnahmen verzichtet wird, ist bei hohem Grundwasserstand das Bauen mit wasserundurchlässigem Beton eine sehr wirtschaftliche Bauweise.

Aufgabe des Planers ist es, die entsprechenden Beanspruchungs- und Nutzungsklassen festzulegen. Die Beanspruchungsklassen berücksichtigen die Art der Beaufschlagung des Bauwerks oder Bauteils mit Feuchte oder Wasser. Beanspruchungsklasse 1 gilt für Bauteile in Kontakt mit anstehendem Wasser, unabhängig vom Druck. Für Bodenfeuchte und nicht stauendes Sickerwasser gilt Beanspruchungsklasse 2. Bei der Festlegung sind die Baugrundeigenschaften und der Bemessungswasserstand heranzuziehen.

Der Begriff der „Nutzungsklasse“ wurde neu eingeführt. Sie ist in Abhängigkeit von der Funktion des Bauwerks und von den Nutzungsanforderungen an das Bauwerk festzulegen. Für Bauwerke oder Bauteile der Nutzungsklasse A ist ein Feuchtetransport in flüssiger Form nicht zulässig, d. h. Feuchtstellen auf der Bauteiloberfläche als Folge von Wasserdurchtritt sind auszuschließen. Ein begrenzter Wasserdurchtritt ist für die Nutzungsklasse B erlaubt. Aufgabe des Planers ist es, die Vorgaben des Bauherrn für die geplante Nutzung der Räume korrekt umzusetzen und den Bauherrn auf eventuell notwendige raumklimatische Maßnahmen hinzuweisen. Ergänzende Erläuterungen zur WU-Richtlinie werden voraussichtlich Anfang 2005 veröffentlicht.

Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen

Seit 1996 gilt für bauliche Anlagen zum Schutz von Boden und Grundwasser vor gefährdenden Stoffen die DAfStb-Richtlinie „Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen“. Bei der Errichtung und dem Betrieb von Anlagen wurden Erfahrungen gesammelt, die die Annahmen der Richtlinie bestätigen. Die Richtlinie hat sich seit ihrem Erscheinen im September 1996 bewährt.

Die 6-teilige Richtlinie wurde im Berichtszeitraum an die neue Normengeneration angepasst. Die über die Jahre gesammelten praktischen Erfahrungen flossen in die Überarbeitung der Richtlinie mit ein. Die Teile 1, 3 und 6 der Richtlinie, Ausgabe 1996, wurden überarbeitet und in Teil 1 der neuen Richtlinie überführt. Teil 1 enthält nun neben den bisherigen Dichtheitsnachweisen ein vereinfachtes, auf der sicheren Seite liegendes Auswahlverfahren, das in der Technischen Regel wassergefährdender Stoffe (TRwS) 132 als Bauweise 6 geführt wird. Die Sicherheitsbeiwerte können in Abhängigkeit vom Überwachungsintervall gewählt werden.

Die Teile 2 und 4 der Richtlinie, Ausgabe 1996, wurden unter der Leitung des Forschungsinstituts bearbeitet. Insbesondere der Teil 2 der Richtlinie, der die Baustoffe und das Einwirken von wassergefährdenden Flüssigkeiten behandelt, erfuhr neben der Anpassung an die neue Normengeneration auch eine konzeptionelle Überarbeitung. So wurden die Regeln zur Verwendung von FDE-Betonen (flüssigkeitsdichter Beton nach Eindringprüfung) vereinfacht. Die bisher als FDE-Betone geführten Betone mit Wasserzementwerten $w/z < 0,45$ und Festigkeitsklassen $> C50/60$ wurden ohne Eindringprüfung in den Bereich des FD-Betons überführt. Durch Verringerung der Prüfflüssigkeiten von 4 auf 2 wird der Prüfaufwand verringert. Die Regelung zur Vergrößerung der Bemessungseindringtiefen bei geringen Feuchtegehalten wurde vereinfacht und dem Konzept der Expositionsklassen nach DIN EN 206-1 angepasst. Für die Expositionsklasse XC1 „trocken“ ist eine 50%ige Erhöhung der Bemessungswerte der Eindringtiefen zu berücksichtigen. Der alte Teil 4 der Richtlinie, der die Prüfverfahren enthält, wurde in einen Anhang A überführt.