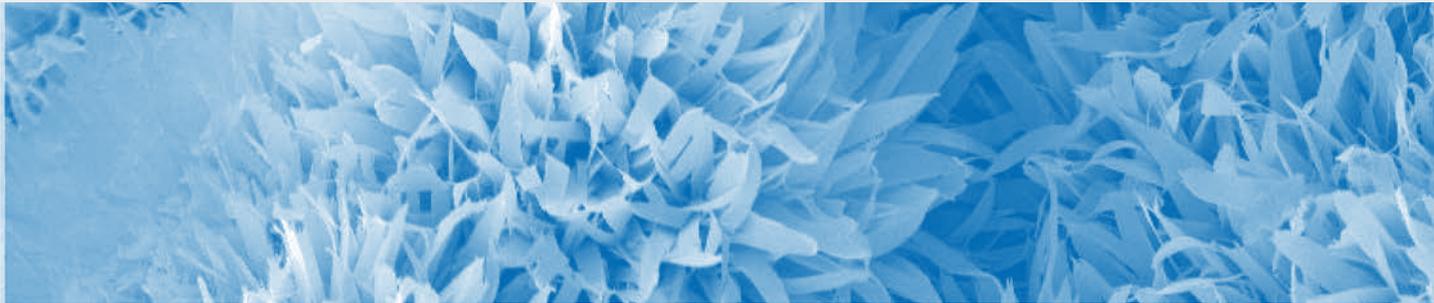
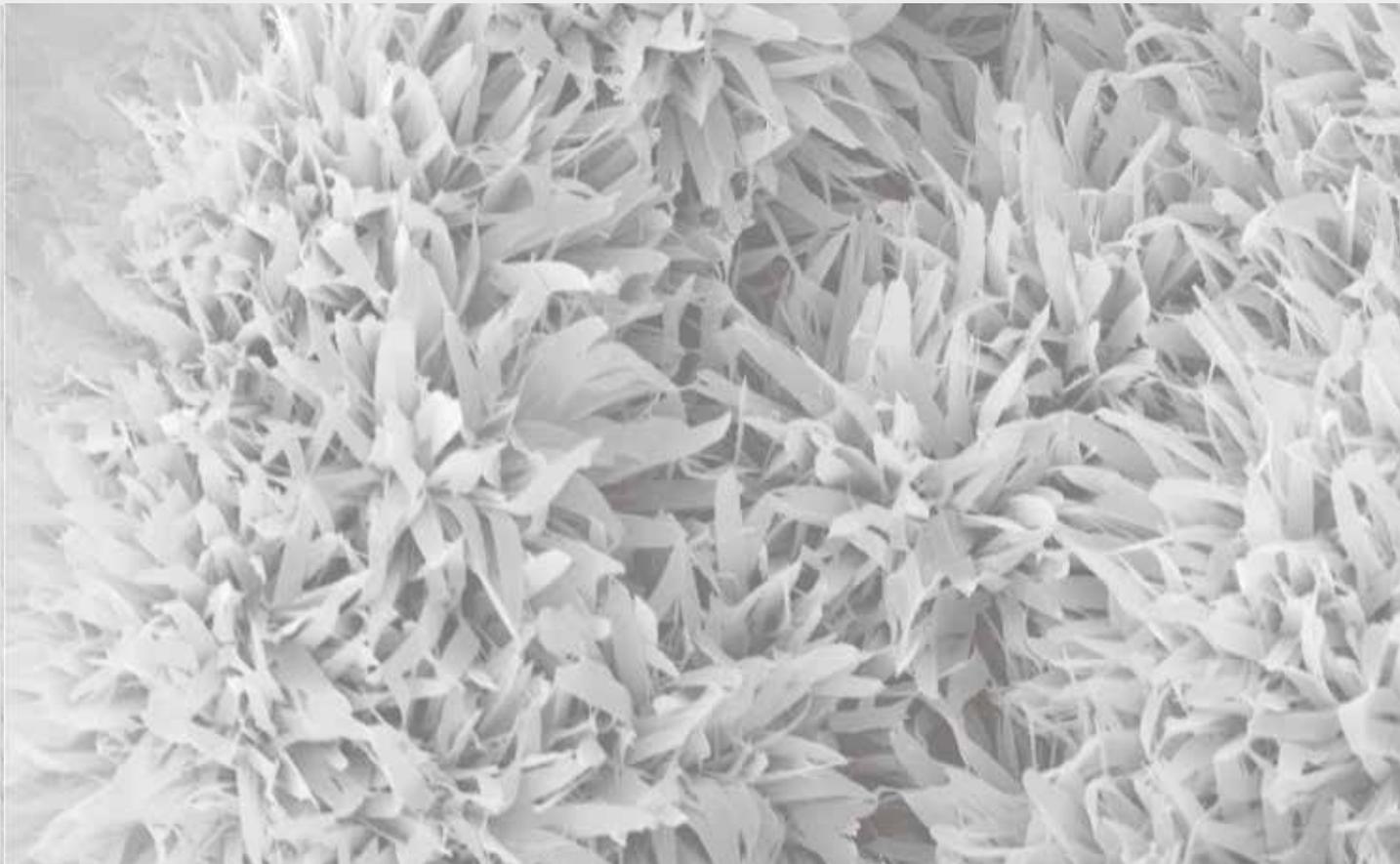


Tätigkeitsbericht

2003 – 2005

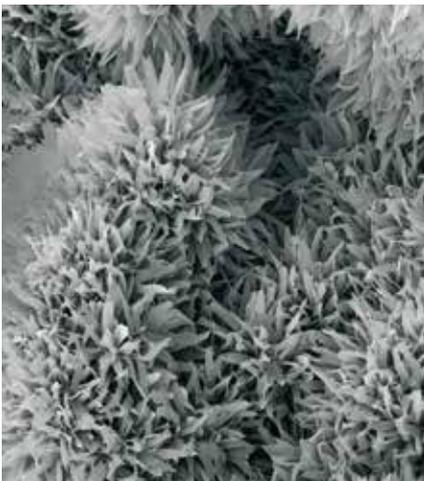


Verein Deutscher Zementwerke e.V.
Forschungsinstitut der Zementindustrie



Tätigkeitsbericht 2003 – 2005

Verein Deutscher Zementwerke e.V.
Forschungsinstitut der Zementindustrie
Postfach 30 10 63, D-40410 Düsseldorf
Tannenstraße 2, D-40476 Düsseldorf
Telefon: (49-211) 45 78-1
Telefax: (49-211) 45 78-296
info@vdz-online.de
www.vdz-online.de



Das Titelbild zeigt eine unter dem Rasterelektronenmikroskop des Forschungsinstituts entstandene Aufnahme.

Der in 1000facher Vergrößerung fotografierte Tobermorit ist ein natürliches Mineral, das sich unter anderem bei der Zementhydratation, aber auch in Kalksandstein und Silicatbeton bildet. In der Natur ist er z.B. in Hohlräumen von Basalten zu finden. Tobermorit ist der „Bindestoff“ im Zementstein und verleiht diesem seine Festigkeit.

Chemisch handelt es sich um ein Calciumsilikat-hydrat. Die so genannten CSH-Phasen machen mit ca. 80 % einen Hauptbestandteil des Zementsteins aus und bestimmen maßgeblich dessen Eigenschaften.

Inhalt

4	Verein Deutscher Zementwerke e.V. Forschungsinstitut der Zementindustrie
6	Gliederung
7	Vorstand
8	Der Verein Deutscher Zementwerke
8	Ausschüsse, Arbeitskreise und Kommissionen
13	Zusammenarbeit mit anderen Organisationen
15	Vermittlung der Erkenntnisse
17	Forschungsinstitut der Zementindustrie
24	I Verfahrenstechnik der Zementherstellung
26	Energieverbrauch
28	Anlagenbetrieb
40	II Umweltschutz bei der Zementherstellung
42	Gesetzgebung
44	Klimaschutz
48	Minderung gas- und staubförmiger Emissionen
62	III Leistungsfähigkeit von Zement
64	Chemisch-mineralogische Zusammensetzung
64	Reaktivität von Hüttensanden
68	Auswirkungen des Phosphatgehalts auf die Zementeigenschaften
69	Einfluss der Korngrößenverteilung von Hauptbestandteilen des Zements
72	Einfluss von Zementhauptbestandteilen auf die Alkalität
75	Sulfatwiderstand
78	Chromat – Analytik und Langzeitstabilität von Chromatreduzierern
81	Mess- und Prüfverfahren
84	Zulassungen
86	IV Güteüberwachung und Qualitätssicherung von Zement
88	Überwachungsgemeinschaft des VDZ
92	Qualitätssicherung
94	Normung
98	V Betonausgangsstoffe und -technologie, Betonbautechnik
100	Portlandkompositzemente
102	Zement und Zusatzmittel
108	Alkali-Kieselsäure-Reaktion
110	Dauerhaftigkeit
114	Sichtbeton
116	Selbstverdichtender Beton
117	Erdfeuchte Betone
118	Verkehrswegebau
120	Brandschutz
121	Modellierung
124	Normung
128	VI Umweltverträglichkeit von Zement und Beton
130	Umweltkriterien für zementgebundene Baustoffe
131	Europäische Bauproduktenrichtlinie
132	DIBt-Merkblatt „Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“
134	DVGW-Arbeitsblatt W 347
136	Nachhaltiges Bauen
138	VII Verantwortung für Mitarbeiter
140	Arbeitssicherheit
142	VDZ-Weiterbildungswerk
146	Veröffentlichungen

Verein Deutscher Zementwerke e.V. Forschungsinstitut der Zementindustrie

Mit dem vorliegenden Tätigkeitsbericht setzt der Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) seine bewährte Tradition fort, die Ergebnisse seiner industriellen Gemeinschaftsforschung der vergangenen Jahre regelmäßig zusammenzufassen. Dieser Bericht umfasst die Jahre 2003 bis 2005 und behandelt alle relevanten Themen der Zementherstellung und -anwendung.

Die Baustoffindustrie befindet sich weltweit in einem sich stark wandelnden Umfeld. Rasches Wachstum in den sich entwickelnden Regionen steht einem starken Absatzrückgang in den reifen Märkten gegenüber. Vor diesem Hintergrund gewinnt die Qualität der Betonbauweise und der Ausbildung der Menschen, die mit zementgebundenen Baustoffen umgehen, zunehmend an Bedeutung. Die industrielle Gemeinschaftsforschung steht vor der Herausforderung, trotz knapper Budgets attraktive, wegweisende Beiträge zur Weiterentwicklung der Zementherstellung und -anwendung zu liefern. Der VDZ hat sich dieser Herausforderung gestellt. Angesichts der wirtschaftlich angespannten Lage der heimischen Zementindustrie hat er seine Arbeit konsequent neu ausgerichtet und stellt sich heute als kompetenter Ansprechpartner in allen Fragen der Zementherstellung und der Betonbauweise dar. Hohe Praxisnähe und schnelle Umsetzbarkeit kennzeichnen seine Forschungsergebnisse. Gleichzeitig bietet der VDZ ein attraktives Dienstleistungs- und Beratungsangebot. Das Forschungsinstitut verfügt über kompetente Mitarbeiter und modernste Instrumente, mit denen neben Standarduntersuchungen auch anspruchsvollste Aufgaben abgedeckt werden können.

Der VDZ hat sich mit seinem Forschungsinstitut konsequent international aufgestellt. Da der Bedarf an attraktiver Forschung nicht an Landesgrenzen Halt macht, nutzt der VDZ seine internationalen Kontakte, aus denen er maßgebliche Erfahrungen für seine Arbeit gewinnt. Den Mitgliedern kommt dies insofern zugute, als der VDZ in europäische Entwicklungen, die Auswirkungen auf die Zementindustrie und die Betonbauweise haben können, eingebunden ist. Zu den jüngsten Herausforderungen auf EU-Ebene zählen Gesetzesvorhaben zum Emissionshandel oder zum Arbeitsschutz beim Umgang mit Zement. Klimaschutz und die Verantwortung für Mitarbeiter und Zementanwender gehören seit jeher zu den Hauptarbeitsgebieten des Forschungsinstituts. Umfangreiche Untersuchungen zur Verringerung des Brennstoffenergiebedarfs und zum Einsatz z. B. von Portlandkompositzementen haben dazu beigetragen, dass die spezifischen CO₂-Emissionen der Zementindustrie in den letzten Jahren deutlich weiter abgesenkt werden konnten. Ergebnisse aus der Arbeit des Instituts zeigen, dass Emissionslimits, wie sie durch die europäische Emissionshandelsrichtlinie gefordert werden, für den weltweiten Klimaschutz ohne Effekt bleiben werden. Es wird vielmehr zu einer Verlagerung von Zementproduktionsstandorten kommen, weil die heimische Industrie keine ausreichende Zahl von CO₂-Zertifikaten kaufen können wird.

Der VDZ kann auf eine mehr als 125-jährige Tradition zurückblicken. Diese lange, erfolgreiche Arbeit ist das Fundament der heutigen industriellen Gemeinschaftsforschung und der Einbindung des VDZ und seines Forschungsinstituts in die Zementindustrie. Hierauf aufbauend hat der VDZ seine Arbeit so ausgerichtet, dass er auch zukünftig durch attraktive Forschung zu einer wettbewerbsfähigen, umweltfreundlichen Zementherstellung und einer qualitativ hochwertigen Betonbauweise beitragen kann.

VEREIN
DEUTSCHER ZEMENTWERKE E.V.

Düsseldorf, im Mai 2005

Das Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf



Verein Deutscher Zementwerke e.V.

Mitgliederversammlung

Techn.-Wiss.
Beirat

Vorstand

Haushalts-
beirat

Vorsitzende

Geschäftsführung

Arbeitsausschüsse

Beton-
technik

Umwelt u.Ver-
fahrenstechnik

Zement-
chemie

Fachauschuss
d. Überw.-Gem.

Techn.-kfm.
Fragen

Rechts-
fragen

Forschungsinstitut der Zementindustrie

Vorstand**Vorsitzender:**

Dr.-Ing. H. O. Gardeik, Wiesbaden

Stellv. Vorsitzende:

Dipl.-Wirtsch.-Ing. G. Hirth, Ulm

Dipl.-Kfm. A. Kern, Heidelberg

Dr.-Ing. J. Albeck, Ulm

Prof. Dr.-Ing. J. Blumbach, Harburg

Dr.-Ing. H. A. Brodersen, Dortmund

Dr. Klaus Eichas, Sehnde (ab 11.11.2003)

Ing. Civil D. Gauthier, Heidelberg

Dipl.-Ing. B. Goedecke, Deuna

C. Gregoire Sainte Marie, Oberursel (ab 4.11.2004)

Dipl.-Ing. P. Korf, Ennigerloh

Dr.-Ing. G. Krogbeumker, Beckum

Dipl.-Ing. A. Lange, Hannover

Dipl.-Ing. Dipl.-Kfm. H.-H. Miebach, Erwitte

Dipl.-Ing. J. Pohlmann, Dotternhausen (bis 30.11.2004)

Ass. jur. G. Roeser, Oberursel (bis 4.11.2004)

Dr. V. Rudert, Wiesbaden

Dr.-Ing. A. Scheuer, Heidelberg

Dr. G. Smetana, Oberursel

Dr. D. Spenner, Erwitte

Dipl.-Ing. R. Wirthwein, Rüdersdorf

Als Vertreter des**Bundesverbandes der Deutschen Zementindustrie e.V.:**

Dipl.-Kfm. H. Bauer, Heidelberg (Präsident)

K. Gernandt, Hamburg (Vizepräsident)

Technisch-Wissenschaftlicher Beirat**Als Vorsitzende des VDZ:**

Dr.-Ing. H. O. Gardeik, Wiesbaden

Dipl.-Wirtsch.-Ing. G. Hirth, Ulm

Dipl.-Kfm. A. Kern, Heidelberg

Obleute der Ausschüsse:

Prof. Dr.-Ing. J. Blumbach, Harburg (Zementchemie, bis 19.04.2005)

Dr.-Ing. H.-M. Ludwig; Karlstadt (Zementchemie, ab 19.04.2005)

Dipl.-Ing. E. Bohlmann, Leimen (Betontechnik)

Dr. A. Glitz, Heidelberg (Recht)

Dipl.-Wirtsch.-Ing. G. Hirth, Ulm (Harmonisierung, bis zur Auflösung des Ausschusses Ende 2004)

Dipl.-Ing. J. Pohlmann, Dotternhausen (Ausschuss Umwelt und Verfahrenstechnik, bis 30.11.2004)

Dr. V. Rudert, Wiesbaden (Fachausschuss der ÜG)

VDZ und Forschungsinstitut:

Dr. M. Schneider

Prof. Dr.-Ing. G. Thielen (bis 31.07.2004)

Haushaltsbeirat und Rechnungsprüfer

Dr.-Ing. G. Krogbeumker, Beckum (Vorsitzender)

Dr. H. Braun, Wiesbaden (bis 19.02.2003)

Dr. St. Fink, Wiesbaden (ab 4.11.2004)

Dipl.-Ing. J. Pohlmann, Dotternhausen (bis 30.11.2004)

Dipl.-Kfm. A. Sponnagel, Ulm

Dipl.-Inform. E. Wittmann, Ratingen

Dipl.-Kfm. H. R. Wolf, Heidelberg (bis 31.10.2004)

Dipl.-Kfm. W. Farke, Ennigerloh (RP)

Dipl.-Bw. St. Laube, Wiesbaden (RP, ab Mai 2004)

Dipl.-Kfm. U. Grüber, Wiesbaden (RP, bis Mai 2004)

Geschäftsführung des VDZ**Hauptgeschäftsführer:**

Dr. M. Schneider

Geschäftsführer:

Prof. Dr.-Ing. G. Thielen (bis 31.07.2004)

Leitung des Forschungsinstituts

Dr. M. Schneider (Vorsitzender)

Prof. Dr.-Ing. G. Thielen (bis 31.07.2004)

Der Verein Deutscher Zementwerke ■

Der Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) mit Sitz in Düsseldorf ist die technisch-wissenschaftliche Vereinigung der deutschen Zementindustrie. Sie setzt die Tradition des am 24. Januar 1877 gegründeten Vereins Deutscher Cement-Fabrikanten fort. Unterschiedliche Standpunkte zwischen der Portland- und der Hüttenzementindustrie in der Frage der Zumahlung granulierter Hochofenschlacke hatten dazu geführt, dass neben dem 1877 gegründeten Verein deutscher Portland-Cement-Fabrikanten ab 1901 der Verein Deutscher Eisenportlandzementwerke und ab 1907 der Verein Deutscher Hochofenzementwerke die technisch-wissenschaftlichen Interessen der deutschen Zementhersteller vertraten. Der Zusammenschluss erfolgte 1948, zunächst unter der Bezeichnung Verein Deutscher Portland- und Hüttenzementwerke. 1952 erhielt die Vereinigung den heutigen Namen Verein Deutscher Zementwerke e. V.

Vereinszweck

Der VDZ verfolgt keine politischen, auf Erwerb abzielenden oder eigenwirtschaftlichen Zwecke und ist von den Finanzbehörden als gemeinnützig anerkannt. Ein Teil seiner satzungsgemäßen Aufgaben wird im Rahmen eines wirtschaftlichen Geschäftsbetriebs wahrgenommen, der mit der Gemeinnützigkeit in Einklang steht. Zweck des Vereins ist die Förderung von Technik und Wissenschaft – einschließlich Forschung und Entwicklung – auf dem Gebiet der Herstellung und Anwendung hydraulischer Bindemittel. Die satzungsgemäßen Gemeinschaftsaufgaben umfassen insbesondere die Entwicklung hydraulischer Bindemittel einschließlich der Zusätze, die Prüfung, Überwachung und Zertifizierung von Zement und zementartigen Bindemitteln im Sinne des Bauproduktengesetzes und privatrechtlicher Qualitätszeichen sowie die Förderung von Maßnahmen für die Qualitätssicherung, den Umweltschutz und die Arbeitssicherheit. Die Mitglieder werden im Rahmen des Vereinszwecks gutachterlich und beratend unterstützt. Dem Transfer der wissenschaftlichen oder aus der betrieblichen Praxis gewonnenen Erkenntnisse dienen Veröffentlichungen, Kolloquien, Seminare, Tagungen und Kongresse.

Ein weiterer Zweck des Vereins ist die Förderung der Aus- und Weiterbildung junger Führungskräfte. Zur Verwirklichung dieses Zwecks verwaltet der Verein seit Juni 1995 die nicht rechtsfähige Wissenschaftsstiftung der deutschen Zementindustrie, die

„Gerd-Wischers-Stiftung“. Die Schulung und Weiterbildung von Mitarbeitern der Mitgliedsunternehmen dient dem gleichen Ziel.

Mitgliedschaft im VDZ

Ordentliches Mitglied kann jede natürliche oder juristische Person werden, die in der Bundesrepublik Deutschland genormte oder bauaufsichtlich zugelassene Zemente bzw. zementartige Bindemittel herstellt. Zementhersteller außerhalb Deutschlands können als außerordentliche Mitglieder ohne Stimmrecht in den VDZ aufgenommen werden.

Dem VDZ gehören zurzeit 27 deutsche Zementunternehmen mit 50 Zementwerken als ordentliche Mitglieder sowie 29 ausländische Zementunternehmen als außerordentliche Mitglieder an.

Organe des VDZ

Organe des VDZ sind die Mitgliederversammlung, der Vorstand, die Geschäftsführung, die Leitung des Forschungsinstituts der Zementindustrie und die Überwachungsgemeinschaft des Vereins als Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle.

Die in der Satzung vorgesehenen jährlichen Mitgliederversammlungen fanden im Berichtszeitraum am 22. Mai 2003 in Baden-Baden und am 13. Mai 2004 in Weimar statt.

Zu den Aufgaben der Mitgliederversammlung gehört die Wahl des Vorsitzenden und seiner Stellvertreter (Engerer Vorstand) sowie der Vorstandsmitglieder, jeweils für eine dreijährige Amtszeit. Die Zusammensetzung des Vorstands muss der Struktur der Zementindustrie hinsichtlich regionaler Verteilung, Betriebsgröße und bevorzugt hergestellter Zementart angemessen sein. Die Wahl des amtierenden Vorstands fand am 16. Mai 2002 statt.

Dem Vorstand obliegen grundsätzlich alle Aufgaben des VDZ. Er bestellt auch die Geschäftsführung des Vereins sowie die Leitung des Forschungsinstituts der Zementindustrie. Dabei wird Personalunion angestrebt, die in den letzten Jahrzehnten auch stets gegeben war.

Ausschüsse, Arbeitskreise und Kommissionen ■

Zwei Beiräte stehen dem Vorstand beratend zur Seite: Der Technisch-Wissenschaftliche Beirat befasst sich mit der Koordinierung der Aufgaben der Ausschüsse sowie der

Forschungsplanung, -durchführung und -auswertung, während der Haushaltsbeirat für Fragen der Finanzierung des VDZ und seines Forschungsinstituts zuständig ist. Dem Technisch-Wissenschaftlichen Beirat gehören der Engere Vorstand, die Obmänner der VDZ-Ausschüsse und -Kommissionen sowie die Geschäftsführung und Institutsleitung an. Die Mitglieder des Haushaltsbeirats werden vom Vorstand gewählt. Zusätzlich ist der Obmann des BDZ-Haushaltsausschusses geborenes Mitglied des Haushaltsbeirats des VDZ.

Für bestimmte Fachbereiche kann der Vorstand Ausschüsse bilden. In ihnen sind Fachleute aus den Mitgliedswerken und aus dem Forschungsinstitut gemeinsam tätig. Derzeit gibt es 6 Ausschüsse (Organigramm S. 8), wobei der Rechtsausschuss ein Gemeinschaftsausschuss des VDZ und des Bundesverbands der Deutschen Zementindustrie (BDZ) ist.

Auf Vorschlag der Ausschüsse kann der Vorstand zur Bearbeitung bestimmter Fragen Arbeitskreise einrichten, denen auch Fachleute von Nichtmitgliedern angehören können. Außerdem setzt der Vorstand für wichtige, interdisziplinäre Fragen Kommissionen ein, denen neben Mitgliedern des Vorstands Fachleute der verschiedenen Disziplinen angehören. Sie werden – ebenso wie die Arbeitskreise – nach Abschluss ihres Auftrags aufgelöst. Im Berichtszeitraum waren eine VDZ-Kommission und zwei VDZ/BDZ-Kommissionen tätig.

Fachausschuss der Überwachungsgemeinschaft des VDZ

Der Fachausschuss (früher Güteüberwachungsausschuss genannt) ist gemäß Vereinssatzung das zuständige Organ für die durch die Überwachungsgemeinschaft des Vereins Deutscher Zementwerke als Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle (PÜZ-Stelle) durchgeführte Güteüberwachung. Er besteht derzeit aus 10 Mitgliedern, die jeweils für eine Amtszeit von 3 Jahren vom Vorstand des VDZ gewählt werden. Dem Fachausschuss gehören auch der Leiter und ein weiterer Vertreter des Forschungsinstituts der Zementindustrie sowie der Leiter der PÜZ-Stelle an. Der Fachausschuss tritt mindestens zweimal jährlich zusammen. Im Berichtszeitraum wurden insgesamt 4 Sitzungen abgehalten.

Hauptaufgabe ist die Beurteilung und abschließende Bewertung der Ergebnisse der durch die Überwachungsgemeinschaft des VDZ durchgeführten Fremdüberwachung. Diese besteht aus der Überwachung, Beur-

teilung und Auswertung der werkseigenen Produktionskontrolle sowie der Durchführung von Fremdüberwachungsprüfungen an Zementproben. Der Fachausschuss diskutierte die Ergebnisse der Überwachung und Zertifizierung und sprach Empfehlungen für die Durchführung der Überwachung aus.

In den vergangenen Jahren hatte sich der Fachausschuss hauptsächlich mit Fragen beschäftigt, die mit der Umstellung der früher national geprägten „Güteüberwachung“ auf europaweit einheitliche Qualitätssicherungskonzepte in Zusammenhang standen. Dies umfasste insbesondere die Fertigstellung von europaweit einheitlichen Normen und zugehörigen Durchführungsbestimmungen sowie die Einführung eines Qualitätssicherungssystems und dessen privatrechtliche Akkreditierung für die Überwachungsgemeinschaft des VDZ über den gesetzlich geforderten Rahmen hinaus. Aufgrund der Neuausrichtung des Forschungsinstituts wurden im Berichtszeitraum vor allem Fragen diskutiert, die mit der konsequenten Professionalisierung der Zertifizierungsdienstleistungen und der Ausweitung des wirtschaftlichen Geschäftsbetriebs in Zusammenhang standen.

Weitere Beratungspunkte betrafen die Beurteilung der Vorgehensweise beim Direktversand, beim Einzelnachweisverfahren sowie bei der Überschreitung von Einzelgrenzwerten, die Überwachung von chromatreduzierten Zementen, Entwicklungen in der Labororganisation, die Durchführung von Vergleichsprüfungen und den Umgang mit privatrechtlichen Zeichen.

Zertifizierungs-Beirat FIZ-Zert

Der Zertifizierungs-Beirat fungiert als Lenkungs-gremium der 1998 eingerichteten Zertifizierungsstelle für Managementsysteme FIZ-Zert. Im Zusammenhang mit der privatrechtlichen Akkreditierung der Überwachungsgemeinschaft des VDZ fungiert er ebenfalls als Beirat für die Produktzertifizierung. Er besteht aus mindestens 5 stimmberechtigten Mitgliedern der interessierten Kreise.

Ausschuss Betontechnik

Arbeitskreise: Feuerbeständigkeit, Verkehrsbau, Zement und Zusatzmittel

Der Ausschuss „Betontechnik“ behandelt Fragen der Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Betontechnologie und Betonanwendung. Neben der intensiven Beratung der aktuellen nationalen und europäischen Normungsaktivitäten werden

durch den Ausschuss die zahlreichen Forschungsprojekte des Instituts begleitet. Der Ausschuss „Betontechnik“ sieht seine Aufgabe darin, die praktischen Anforderungen bei der Anwendung von Zement in Mörtel und Beton mit der Forschung und Normung auf diesem Gebiet zu koordinieren.

Schwerpunkt im Berichtszeitraum waren neben dem immer noch aktuellen Thema „Normung von Zement und Beton“ die Themen „Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton“, „Sulfatwiderstand und Thaumasilbildung“ sowie weitere Fragen, die sich mit der Dauerhaftigkeit des Betons auseinandersetzen.

Nach der Einführung der neuen Normengeneration für Beton im Jahre 2001 haben sich durch die aktive Anwendung dieser Norm einige zum Teil nicht abschließend geklärte Fragestellungen aufgetan. Ein wesentlicher Punkt war dabei die Erweiterung der Anrechenbarkeit von Flugasche im Beton für alle CEM II-Zemente, soweit diese für alle Expositions-klassen verwendet werden dürfen. Zur Vereinfachung der Norm wurden Sonderbetone ausgliedert. So wurden im Berichtszeitraum z.B. die Erarbeitung der Richtlinien des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) „Massige Bauteile aus Beton“ und „Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton“ begleitet.

Im Schwerpunktthema „Sulfatwiderstand und Thaumasilbildung“ konnte eine ungerechtfertigte Benachteiligung des Einsatzes bestimmter Zementarten in Betonen mit hohem Widerstand gegen Sulfatangriff erfolgreich vermieden werden. Gestützt auf die Forschungsergebnisse des Instituts wurde ein industrieübergreifender Kompromiss erzielt, der auch zukünftig ein schadenfreies Bauen sicherstellt.

Das Themengebiet „Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton“ ist aufgrund einiger Schäden an Betonfahrbahndecken erneut in den Vordergrund gerückt. Der Ausschuss hat intensiv die Forschung des Instituts für die Performance-Prüfverfahren unterstützt.

Der Arbeitskreis „Feuerbeständigkeit“ verfolgt die nationale und europäische Normung auf dem Gebiet des Brandschutzes. Mit der Anpassung der brandschutztechnischen Bemessungsregeln an die zukünftigen europäischen Regeln des Eurocode sind die für den Massivbau relevanten Regelungen grundsätzlich so gestaltet, dass sie für die nächsten 8 bis 10 Jahre Gültigkeit haben. Es wurden technische und

marktwirtschaftliche Argumente gesammelt, die den Vorteil von Betonbauteilen bei Bränden hinsichtlich eines wirksamen Sachschutzes belegen.

Im Arbeitskreis „Verkehrsbau“ wurden die Schwerpunktthemen „Oberflächeneigenschaften von Betonfahrbahndecken“, „Einsatz von CEM II-Zementen im Fahrbahndeckenbeton“, „Feste Fahrbahn“ sowie „Durchlaufend bewehrte Betondecken“ behandelt. Um die Einsatzchancen von CEM II- und CEM III-Zementen im Straßenbau zu verbessern, wird derzeit ein Argumentationspapier erarbeitet.

Die Aufgaben des Arbeitskreises „Zement und Zusatzmittel“ haben sich aufgrund der wirtschaftlich veränderten Interessenslage der Zementindustrie im Geschäftsbereich „Betonzusatzmittel“ verändert. Während im Berichtszeitraum der Arbeitskreis nicht getagt hat, wird der Arbeitskreis die Forschungsprojekte des Instituts, die sich mit Fragen der Wirkungsweise von Betonzusatzmitteln und mit den Wechselwirkungen zwischen Zement und Zusatzmitteln beschäftigen, fachlich begleiten.

Ausschuss Zementchemie

Arbeitskreise: Analytische Chemie, Leistungsfähigkeit von Zementbestandteilen

Die Tätigkeit des Ausschusses Zementchemie konzentrierte sich im Berichtszeitraum auf die Themenkomplexe „Chromatreduktion“, „Alkali-Kieselsäure-Reaktion“, „Auswirkungen des Tiermehleinsatzes auf Klinkerqualität und Zement-eigenschaften“ sowie die „Leistungsfähigkeit von Flugaschen und Kalksteinmehlen“. Die Anforderungen der europäischen Chromatrichtlinie 2003/53/EG, die im Frühjahr 2004 in deutsches Recht umgesetzt wurde, müssen ab dem 17.01.2005 von allen Herstellern von Zement und zementhaltigen Zubereitungen erfüllt werden. Sie fordert ein harmonisiertes Prüfverfahren zur Chromatbestimmung sowie eine festgelegte Vorgehensweise der Zementhersteller zur Einhaltung der Richtlinie. Der Ausschuss hat sich intensiv mit dem Entwurf der europäischen Prüfnorm zur Chromatbestimmung (prEN 196-10) sowie mit der Lagerstabilität chromatreduzierter Silozemente befasst.

Neben den bekannten alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen gibt es solche mit geringer Reaktivität, die nur unter ungünstigen Bedingungen, z.B. im Straßenbau infolge einer Alkalizufuhr durch Aufbaumittel, zu einer schädigenden Al-

kali-Kieselsäure-Reaktion führen können. Im Forschungsinstitut werden mehrere Forschungsvorhaben durchgeführt, die sich mit der Alkali-Kieselsäure-Reaktion befassen. Aus Sicht des Ausschusses ist bei den Forschungsarbeiten insbesondere die Bestimmung und Bewertung des tatsächlich wirksamen Alkaligehalts der Zemente von Bedeutung.

Der Einsatz von Tiermehl als Sekundärbrennstoff kann den Eintrag von Phosphat in den Klinker erhöhen. Untersuchungen des Forschungsinstituts, die in enger Abstimmung mit der deutschen Zementindustrie durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass Phosphat aktiv in die Reaktionen während des Klinkerbrennprozesses eingreift und auch die Zementeigenschaften verändert. Sie haben jedoch auch ergeben, dass Phosphatgehalte bis zu 1 M.-% produktverträglich sind, wenn die anderen Klinker- und Zementparameter wie z.B. der Kalkstandard auf den Phosphateinbau abgestimmt werden.

Der Arbeitskreis „Analytische Chemie“ hat im Berichtszeitraum zahlreiche Arbeiten abgeschlossen, z.B. den Bericht „Darstellung des Stands der Technik für die Spurenelementbestimmung“ für den Arbeitskreis „Spurenelemente“ oder die Auswertung von Vergleichsversuchen an Referenzementen. Es stehen nunmehr zertifizierte Referenzmaterialien für die Bestimmung der Haupt- und Nebenbestandteile zur Verfügung, die beim Forschungsinstitut bezogen werden können. Weiterhin wurde mit neuen Vergleichsversuchen zur Rietveld-Verfeinerung begonnen, deren Ergebnisse im Frühsommer 2005 vorliegen sollen.

Der Arbeitskreis „Leistungsfähigkeit von Zementbestandteilen“ befasste sich im Berichtszeitraum unter anderem mit den grundlegenden Reaktionsmechanismen von Steinkohleflugaschen und ihrem Verhalten in der Anwendung sowie mit dem Verhalten von Kalksteinmehl als Zementbestandteil. Bei den Steinkohleflugaschen zeigte sich, dass beispielsweise der Eisen-gehalt der Asche einen erheblichen Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften haben kann. So konnten die beobachteten erheblichen Schwankungen des Wasseranspruchs einer Flugasche und die damit verbundenen betontechnologischen Auswirkungen durch einen höheren und gleichmäßigeren Eisen-gehalt abgestellt werden. Hinsichtlich des Verhaltens von Kalksteinmehlen liegt der Schwerpunkt der Arbeiten auf der Frage, welchen aktiven Beitrag Kalksteinmehl zur Hydratation der Zementbestandteile leistet,

und von welchen Faktoren dieser Beitrag bestimmt wird.

Ausschuss Umwelt und Verfahrenstechnik

Arbeitskreise: Umweltverträgliche Abbauführung, Betriebsverhalten von Vorcalcinieranlagen, Feuerfeste Materialien, Arbeitssicherheit, NO_x-Minderung, Spurenelemente, Lehrgangsbeirat

Der Vorstand des VDZ hatte Ende 2002 beschlossen, die Ausschüsse „Umwelt“ und „Verfahrenstechnik“ zusammenzulegen. Damit wurde der aktuellen wirtschaftlichen Situation der Zementindustrie Rechnung getragen. Der neue Ausschuss betreut die Arbeitskreise, die bisher den Ausschüssen „Umwelt“ und „Verfahrenstechnik“ zugeordnet waren.

Im Berichtszeitraum bearbeitete der Ausschuss schwerpunktmäßig Fragen zum Einsatz von sekundären Brenn- und Rohstoffen sowie zur Umsetzung der 17. BImSchV und deren Auswirkungen auf den Betrieb. In den Sitzungen wurden ferner die Themen Betriebserfahrungen mit Entstaubungstechniken, Quarzfeinstaubemissionen, Verwertung von Klärschlamm und CO₂-Emissionshandel erörtert und diskutiert.

Im Frühjahr 2003 hielt der neu gegründete Ausschuss seine erste Vollsitzung als Fachtagung Zement-Verfahrenstechnik ab. Die Betriebserfahrungen mit Bypass-Anlagen sowie die Betriebserfahrungen beim Einsatz von Tiermehl und Klärschlamm stießen bei den 100 Teilnehmern der VDZ-internen Sitzung auf großes Interesse.

Nachdem der Arbeitskreis „SO₂-Minderung / Stoffkreisläufe“ seine Arbeiten mit der Fertigstellung des Merkblatts abgeschlossen hatte, begann der Arbeitskreis „Umweltverträgliche Abbauführung“ mit seinen Arbeiten im Herbst 2003. Aufbauend auf den Arbeiten der VDZ/BDZ-Kommission „Rohstoffsicherung“ hat der Arbeitskreis die Aufgabe, einen Leitfaden für die umweltverträgliche Abbauführung zu erstellen. Der Leitfaden soll die technischen Möglichkeiten einer umweltverträglichen Abbauführung zusammenfassend darstellen. Zielgruppe sind die Ingenieurs-ebene bzw. die Verantwortlichen für die Rohstoffsicherung in Zementwerken.

Der Arbeitskreis „Betriebsverhalten von Vorcalcinieranlagen“ hat seine Arbeiten mit der Erstellung eines Merkblatts abgeschlossen. Im Merkblatt werden die Betriebser-

fahrungen mit neuen Vorcalcinieranlagen in Bezug auf Emissionsverhalten, Einsatz von Sekundärbrennstoffen, Standzeit der feuerfesten Ausmauerung sowie der Einfluss auf die Klinkereigenschaften und den Energieverbrauch zusammengefasst.

In den vergangenen Jahren ist das in den Zementwerken verfügbare Know-How bezüglich des Einsatzes feuerfester Materialien zurückgegangen. Deshalb hat der Ausschuss „Umwelt und Verfahrenstechnik“ vorgeschlagen, den Kenntnisstand zum Thema „Feuerfeste Materialien“ in einem Arbeitskreis zusammenzustellen. Dazu sollen die bisherigen Arbeiten auf dem Gebiet aktualisiert und zusammenfassend dargestellt werden. Folgende Themen sollen vom Arbeitskreis bearbeitet werden: Zustandsdiagnose feuerfester Materialien, Ausbruchtechniken, Einbautechniken, Sicherheitsaspekte, Auswahl, Aufheizprogramme, Einfluss veränderter Einsatzbedingungen auf die Standzeit, Ankertechnik, Heißreparatur und Korrosionsprobleme.

Zu den ständigen Aufgaben des Arbeitskreises „Arbeitssicherheit“ gehören die Analyse des Unfallgeschehens in den Mitgliedswerken, die Ermittlung statistischer Kennzahlen und die Erarbeitung und Empfehlung von Maßnahmen zur Verbesserung der Arbeitssicherheit sowie die Ausarbeitung von Sicherheits-Merkblättern und -Prüflisten. In Zusammenarbeit mit der Steinbruchs-Berufsgenossenschaft wurden die Arbeitssicherseminare für Industriemeister mit neuen Themen als Dauereinrichtung weitergeführt.

Der Ausschuss wird zur Betreuung der Weiterbildungslehrgänge von einem Lehrgangsbeirat unterstützt. Im Berichtszeitraum wurden der 21. Industriemeister-Lehrgang „Kalk / Zement“ sowie der 10. und 11. Produktionssteuerer-Lehrgang „Zement“ erfolgreich abgeschlossen. Darüber hinaus wurde die Erarbeitung von Musterlehrbriefen mit typischen Schulungsthemen für Mitarbeiter von Zementwerken zur Unterstützung der werkseitigen Ausbildung fortgeführt. Bis zum Ende des Berichtszeitraums waren 31 der insgesamt 46 geplanten Musterlehrbriefe fertig gestellt und den Mitgliedswerken zur Verfügung gestellt.

Der Arbeitskreis „NO_x-Minderung“ hat sich intensiv mit den Fragen der Wirksamkeit des SNCR-Verfahrens unter Beachtung verschiedener Reduktionsmittel und Betriebsbedingungen beschäftigt. Darüber hinaus hat sich der Arbeitskreis

mit der Kombination der Verfahren der gestuften Verbrennungsführung im Calcinator und des SNCR-Verfahrens sowie mit dem SCR-Projekt in einem deutschen Zementwerk auseinandergesetzt. Zusätzlich wurde eine Kostenschätzung für das SNCR- und das SCR-Verfahren durchgeführt.

Der Arbeitskreis „Spurenelemente“ hat die noch ausstehenden Arbeiten weitgehend abgeschlossen. Die verschiedenen Sachberichte (Probenahme, Produktionsprozess und Zementanwendung) werden zurzeit fertig gestellt. Diese umfassenden Berichte um die Thematik „Spurenelemente“ sollen den VDZ-Mitgliedern in Kürze über das Intranet zur Verfügung gestellt werden.

Harmonisierungsausschuss für technisch-kaufmännische Fragen

Als Gemeinschaftsgremium von VDZ und BDZ hat der Harmonisierungsausschuss Fragen beraten, die sowohl einen technischen als auch einen kaufmännischen Hintergrund haben. Im Berichtszeitraum befasste sich der Ausschuss besonders mit den Regelungen für den CO₂-Emissionshandel, mit der Herstellung chromatarmen Zement und Produkte sowie mit der Entwicklung bei den CEM II-Zementen und bei der Hüttensanderzeugung.

Vor dem Hintergrund der Verpflichtung der Europäischen Union im Kyoto-Protokoll zur CO₂-Minderung bis 2012 wurde auf europäischer Ebene ein Emissionshandelssystem für CO₂-Emissionsrechte eingeführt, und es wurden entsprechende Regeln festgelegt. Die Ausgestaltung und die Umsetzung der daraufhin in Deutschland erlassenen gesetzlichen Vorgaben für den Treibhausgas-Emissionshandel und die nationalen Allokationspläne wurden in gemeinsamen Sitzungen des Harmonisierungsausschusses und der VDZ-Kommission „Emissionshandel“ erörtert. Kernpunkt für die Zementindustrie war die Forderung, dass bei der Zuteilung von CO₂-Emissionsrechten für das aus der Entsäuerung resultierende CO₂ (Prozess-CO₂) und das aus dem Sekundärbrennstoff-Einsatz resultierende CO₂ eine bedarfsgerechte und kostenlose Zuteilung erfolgt (siehe auch Bericht zur Kommission „Emissionshandel“).

Die Umsetzung der EU-Richtlinie 2003/53/EG in deutsches Recht, mit der das „In-Verkehr-Bringen“ und die Verwendung von chromathaltigen Zementen und zementhaltigen Zubereitungen geregelt werden, wurde intensiv im Harmonisierungsausschuss diskutiert. Dabei kam es zu dem

Entschluss, dass mit Beginn von 2005 in Deutschland neben dem Sackzement auch Silozemente chromatreduziert, d. h. mit einem Gehalt an wasserlöslichem Chrom(VI) von höchstens 2 ppm bezogen auf die Trockenmasse, angeboten werden.

Die Einführung der europäischen Zementnorm EN 197-1 hat die Möglichkeiten, Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen herzustellen, deutlich erweitert. In der Festigkeitsklasse 32,5 liegt der Anteil der CEM II-Zemente bereits über dem des CEM I-Zements. Der vermehrte Einsatz von CEM II-Zementen trägt durch eine Reduktion des Klinkeranteils zur Minderung der CO₂-Emissionen bei. In diesem Zusammenhang erörterte der Ausschuss auch die Entwicklung bei den Stoffen, die bei der Zementproduktion als Klinkerersatz verwendet werden können, wie z. B. gemahlener Hüttensand oder Flugasche. Beim Hüttensand zeichnet sich bis 2006 ein Anstieg bei der Erzeugung ab. Bei stagnierendem Zement-Inlandsversand kann sich ein Überhang beim Hüttensand in Deutschland ergeben.

Aufgrund der Umstrukturierung im Verbandsbereich von VDZ und BDZ können Fragen, die bislang im Harmonisierungsausschuss diskutiert und koordiniert wurden, zukünftig stärker in anderen Gremien, insbesondere in den Vorstandssitzungen, behandelt werden. Aus diesem Grund wurde der Harmonisierungsausschuss Ende 2004 aufgelöst.

Rechtsausschuss

Der Rechtsausschuss ist ein Gemeinschaftsausschuss von VDZ und BDZ. Er befasst sich mit allen rechtlichen Fragen der Zementherstellung und -anwendung. Es werden aber auch andere Rechtsfragen, wie z. B. solche des Umwelt-, Kartell- und Unternehmensrechts, von den Mitgliedern diskutiert.

Die Einführung des europäischen Emissionshandels hat den Ausschuss in mehreren Sitzungen beschäftigt. Im Mittelpunkt standen Fragen des Rechtsschutzes für die Unternehmen gegenüber den Behörden und Möglichkeiten zur Einflussnahme auf die Ausgestaltung des deutschen Emissionshandelssystems. Dabei konnte der Ausschuss in einer Reihe von Einzelfragen den Mitgliedern durch seine Expertise unterstützend zur Seite stehen.

Weiterhin hat der Ausschuss die Entwicklung der Rechtsprechung zum Umweltschutz auf nationaler und europäischer Ebene und die zahlreichen Arbeiten an

neuen Rechtsvorhaben auf diesem Gebiet aufmerksam verfolgt und ihre Konsequenzen für die Zementindustrie diskutiert.

Ein Schwerpunkt der Diskussion im Bereich des Wettbewerbsrechts bildet die geplante 7. Novelle des GWB. Danach ist der Unternehmer künftig selbst dafür verantwortlich zu überprüfen, ob seine Verhaltensweisen und Kooperationen im Einklang mit dem Kartellrecht stehen. Der Gefahr der Nicht-Erkennung und der Fehleinschätzung wettbewerbsrelevanter Sachverhalte kann der Unternehmer nur durch ein Risikomanagement-System entgegenwirken, das eine systematische Beobachtung und Beurteilung wettbewerbsrechtlicher Risiken beinhaltet.

Von unmittelbarer Bedeutung für die Zementproduktion sind die Konsequenzen aus der Novellierung der Chemikalienverbotverordnung und der Gefahrstoffverordnung für die Chromatreduzierung. Hier hatte sich der Ausschuss vor allem mit der Frage zu befassen, welche Regelung bezüglich der Reduktion gilt – insbesondere dann, wenn diese z. B. bei der Transportbetonherstellung stattfindet.

VDZ-Kommission Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Die Kommission hat sich intensiv mit Schäden an Betonfahrbahndecken auseinandergesetzt. Das Forschungsinstitut hatte festgestellt, dass hierbei in einigen Fällen eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) beteiligt war. Die Kommission hat Strategien für die Vermeidung dieser Schäden entwickelt und Empfehlungen für die Senkung des wirksamen Alkaligehalts von Fahrbahndeckenzementen ausgearbeitet. Darüber hinaus hat sie empfohlen, bekanntermaßen reaktive Gesteinskörnungen im Fahrbahndeckenbau nicht oder nur nach Vorliegen eines Gutachtens zu verwenden (siehe auch Kapitel V, Abschnitt Verkehrsbau). Weiterhin begleitet die Kommission die Forschung des Instituts zur Erweiterung der Palette der NA-Zemente und zur Anwendung von Zusatzstoffen, die zur Vermeidung einer schädigenden AKR beitragen können.

VDZ / BDZ-Kommission „Emissionshandel“

Die Kommission „Emissionshandel“ ist im Jahr 2003 aus der Kommission „CO₂-Minderung“ hervorgegangen. Damit wurde der zunehmenden Bedeutung des CO₂-Emissionshandels für die Zementindustrie Rechnung getragen. Die Kommission hat die Aufgabe, die Einführung und Umsetzung des CO₂-Emissionshandels

in Deutschland zu begleiten. Ein weiterer Arbeitsschwerpunkt ist die Diskussion der Ergebnisse des jährlich durchgeführten CO₂-Monitorings.

Seit Mitte 2003 hat die Kommission intensiv die Umsetzung der EU-Richtlinie zur Einführung eines EU-weiten CO₂-Emissionshandels in der Bundesrepublik Deutschland diskutiert. Zunächst standen die Formulierung und die quantitative Ausgestaltung des Nationalen Allokationsplans (NAP) für die 1. Handelsperiode 2005/2007 im Mittelpunkt. Nach Vorlage des NAP bei der EU-Kommission durch die Bundesregierung erfolgte die Umsetzung in deutsches Recht. Die Einzelheiten des Treibhausgas-Emissionshandels-Gesetzes (TEHG) und des Zuteilungsgesetzes 2007 (ZuG 2007) wurden intensiv diskutiert und verschiedene Aktivitäten der Zementindustrie gegenüber BMU und BMA koordiniert.

Um die Mitgliedsunternehmen möglichst zeitnah auf dem Laufenden zu halten, wurden Workshops zu den Themen „CO₂-Datenerhebung“ sowie „Antragstellung mit der RISA-Software“ veranstaltet. Darüber hinaus wurde eine Fachtagung im Forschungsinstitut, unter anderem mit externen Vortragenden, durchgeführt.

Die Ergebnisse der Monitoring-Umfragen aus den Jahren 2000 bis 2004 wurden in der Kommission diskutiert. Sie zeigen, dass die Zementindustrie weiterhin auf einem guten Weg ist, ihre aktualisierte Selbstverpflichtung zum Klimaschutz einzuhalten. Für die Jahre 2000 bis 2003 wurde ein gemeinsamer Monitoring-Bericht erstellt, der über die Website des Forschungsinstituts zum Download bereit steht.

VDZ / BDZ-Kommission „Umweltverträgliche Verwertung von Sekundärstoffen“

Der Einsatz geeigneter Abfälle ist in den deutschen Zementwerken in den vergangenen Jahren kontinuierlich angestiegen. Im Jahr 2004 konnten dadurch bereits etwa 40 % des Brennstoffenergiebedarfs durch solche alternativen Materialien abgedeckt werden. Unter der Federführung der Sekundärstoffkommission werden die tatsächlich eingesetzten Abfallmengen ebenso wie die Emissionen der in Deutschland betriebenen Drehofenanlagen einmal jährlich erfasst und veröffentlicht. Durch diese Maßnahme ist es gelungen, ein hohes Maß an Transparenz auch gegenüber den am Abfalleinsatz in Industrieanlagen und speziell in Anlagen der Zementindustrie interessierten Kreisen zu erreichen. Der

Einsatz geeigneter Ersatzbrennstoffe wird für die deutsche Zementindustrie auch weiterhin eine wesentliche Rolle spielen.

Die Frage, ob bestimmte Stoffe innerhalb eines Zementwerks verwertet werden können, hängt neben technischen Aspekten insbesondere auch von politischen bzw. abfallrechtlichen Entscheidungen ab. Vor diesem Hintergrund war eine Entscheidung des europäischen Gerichtshofs (EUGH) vom Februar 2003 für die Zementindustrie von besonderer Bedeutung, bei der es um die Zulässigkeit einer Verbringung von heizwertreichen Abfällen aus Deutschland in belgische Zementwerke ging. Das EUGH-Urteil hierzu ist von der Sekundärstoffkommission eingehend analysiert worden. Besonders interessant sind aus Sicht der Zementindustrie dabei die Kriterien, die der EUGH als kennzeichnend für eine Verwertungsmaßnahme aufgeführt hat. Danach dürfen beispielsweise Eigenschaften wie Heizwerte oder Schadstoffgehalte von Abfällen für eine Abgrenzung zwischen Verwertung und Beseitigung keine Rolle spielen. Das deutsche Abfallrecht (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz) ist allerdings trotz dieser klaren Aussagen des europäischen Gerichtshofs nicht geändert worden. In Deutschland ist nach wie vor ein Mindestheizwert von 11 MJ/kg als Zulässigkeitschwelle für eine Verwertungsmaßnahme festgesetzt.

Ein anderer wichtiger Schwerpunkt der Arbeit der Sekundärstoffkommission im Berichtszeitraum war der Einsatz von Klärschlämmen in Zementwerken. Aus dem europäischen Ausland, insbesondere der Schweiz, ist bekannt, dass Zementwerke sehr gut dafür geeignet sind, Klärschlämme einer simultanen stofflichen und energetischen Verwertung zuzuführen. In der Vergangenheit war ein solcher Klärschlammeinsatz in Zementwerken in Deutschland politisch nicht gewünscht; vielmehr sind große Mengen an Klärschlämmen insbesondere aus dem kommunalen Bereich in der Landwirtschaft verwertet worden. Hier zeichnet sich nun aus verschiedenen Gründen ein Wandel der politischen Meinung ab. Zwischenzeitlich sind in verschiedenen deutschen Zementwerken teilweise länger andauernde Versuche zum Einsatz von Klärschlämmen durchgeführt worden, die innerhalb der Sekundärstoffkommission intensiv diskutiert worden sind. In Baden-Württemberg wurde darüber hinaus in Zusammenarbeit mit dem Umweltministerium ein Langzeitversuch zum Einsatz von Klärschlämmen in einem Zementwerk durchgeführt. Über dieses behördlich begleitete Messprogramm

konnte gezeigt werden, dass der Einsatz von Klärschlämmen weder zu nachteiligen Auswirkungen auf die Emissionssituation noch zu einer negativen Beeinflussung der Produktqualität führte.

Weiterhin befasste sich die Sekundärstoffkommission strategisch mit der Umsetzung der TA Siedlungsabfall sowie der zu erwartenden zukünftigen Massenentwicklung für Sekundärbrennstoffe. Hier sind ab Mitte des Jahres 2005 Veränderungen zu erwarten, da unbehandelte Abfälle ab dem 1. Juni 2005 nicht mehr deponiert werden dürfen. Das Bundesumweltministerium hat mehrfach bekräftigt, an diesem Termin festhalten zu wollen. Damit ist spätestens ab Mitte 2005 mit drastischen Veränderungen in der Abfallwirtschaft zu rechnen. Die Hausmüll-Verbrennungsanlagen werden voraussichtlich mit andienungspflichtigen Haus- und Siedlungsabfällen ausgelastet sein. Verschiedene Erhebungen prognostizieren, dass dann für 5 bis 7 Mio. Tonnen Abfall die erforderlichen thermischen Behandlungskapazitäten fehlen werden. Die deutsche Zementindustrie hat sich auf diese Situation eingestellt, indem viele Werke entsprechende Genehmigungsverfahren für eine Erhöhung des Sekundärbrennstoffeinsatzes bereits abgeschlossen haben bzw. diese gegenwärtig durchführen.

Eine Voraussetzung für die tatsächliche Steigerung des Einsatzes alternativer Brennstoffe ist die Einhaltung von Qualitätsparametern, mit denen sich die Sekundärstoffkommission intensiv auseinandergesetzt hat. Im Zusammenhang mit dem ab Mitte 2005 erhöhten Bedarf an energetischen Verwertungsmöglichkeiten ist allerdings darauf hinzuweisen, dass auch die in der novellierten 17. BImSchV enthaltene 60-%-Regelung für Staub- und NO_x-Grenzwerte unter Umständen eine weitere Steigerung des Einsatzes alternativer Brennstoffe hemmen könnte. Auch mit dieser Thematik hat sich die Sekundärstoffkommission befasst.

Die spätestens zum 28.12.2005 umzusetzende novellierte Abfallverbrennungsanlagen-Verordnung (17. BImSchV) enthält strenge Anforderungen. Insbesondere legt sie für Mitverbrennungsanlagen die gleichen Emissionen an Spurenelementen sowie Dioxinen und Furanen wie für Müllverbrennungsanlagen fest. Die Drehofenanlagen in der deutschen Zementindustrie, die Abfälle verwerten, erfüllen diese weltweit strengsten Auflagen. Dies ist mit ein Grund dafür, dass in umweltpolitischen Diskussionen mittlerweile akzeptiert wird, dass Abfallbrennstoffe in Zementdreh-

ofenanlagen umweltverträglich und schadlos verwertet werden können. Allerdings hat es in der jüngeren Vergangenheit vermehrt wissenschaftliche Studien gegeben, die sich mit den möglichen Auswirkungen eines Abfalleinsatzes auf die Produktqualität der Zementwerke befassen haben. Über die Sekundärstoffkommission sind solche Studien von der Zementindustrie mit begleitet worden. Danach führen Art und Umfang des Abfalleinsatzes in der deutschen Zementindustrie zu keinerlei Beeinträchtigung der Produktqualität. Speziell bezogen auf Spurenelemente, die in der umweltpolitischen Diskussion immer eine wesentliche Rolle spielen, ist festzustellen, dass die primären Rohstoffe den wichtigsten Eintragspfad in den Zement darstellen.

Trotz dieser klaren wissenschaftlichen Erkenntnisse ist davon auszugehen, dass zukünftig zumindest die politische Diskussion zum Abfalleinsatz vermehrt auf die Frage fokussiert sein wird, welche möglichen Auswirkungen auf zementhaltige Bindemittel zu erwarten sind. Deshalb sieht die Sekundärstoffkommission einen ihrer Hauptthemenschwerpunkte zukünftig in der ökologischen Positionierung von Zement und Beton. Außerdem ist festzustellen, dass die Abfallwirtschaftspolitik in ständig steigendem Maß von internationalen Entwicklungen beeinflusst wird. Auch hier wird die Sekundärstoffkommission weiterhin tätig sein. Parallel werden über die Sekundärstoffkommission deutsche Positionen in internationale Arbeitsgruppen, z. B. im CEMBUREAU oder dem World Business Council for Sustainable Development, eingebracht. Dadurch ist gewährleistet, dass das hohe technische Niveau, das der Abfalleinsatz speziell in den deutschen Zementwerken mittlerweile erreicht hat, auch international Berücksichtigung findet.

Zusammenarbeit mit anderen Organisationen ■

Ausschüsse, Arbeitskreise und das Forschungsinstitut arbeiten auf zahlreichen Gebieten national wie auch international mit anderen Institutionen zusammen. Hierzu gehören Behörden, Hochschulen, Materialprüfanstalten und eine Reihe von Fachverbänden und Normungsausschüssen sowie Organisationen verwandter Industrien. In vielen Fällen ist der VDZ durch einzelne Mitarbeiter des Instituts in den Gremien dieser Organisationen vertreten. Auch im vorliegenden Berichtszeitraum hat diese Zusammenarbeit in vielen Themenbereichen wiederum zu sehr guten Ergebnissen geführt.

Bundesverband der Deutschen Zementindustrie

Der Bundesverband der Deutschen Zementindustrie (BDZ) ist die berufsständische Organisation der deutschen Zementindustrie. Zu seinen Aufgaben gehören unter anderem die wirtschaftspolitische Interessenvertretung, die Öffentlichkeitsarbeit und die gezielte Information über marktrelevante Fragen der Betonbauweise. Eine Verzahnung von VDZ und BDZ ist seit vielen Jahren gewährleistet. Erstmalig wurde die Zusammenarbeit zwischen beiden Organisationen dadurch stärker herausgehoben, dass sowohl der VDZ als auch der BDZ seit Sommer 2004 unter einer gemeinsamen Führung stehen. Dadurch ist gewährleistet, dass die Mitglieder optimal in die Arbeit der beiden Organisationen eingebunden sind. Ein gemeinsamer Auftritt von VDZ und BDZ gewährleistet einerseits, dass aktuelle Forschungsergebnisse aus der VDZ-Arbeit allen Interessierten schnell und sachgerecht zur Verfügung gestellt werden können. Gleichzeitig kann der Bundesverband für seine wirtschaftspolitische Arbeit falls erforderlich auf dieses solide technisch-wissenschaftliche Fundament zurückgreifen. An den beiden Standorten Düsseldorf und Berlin verfügt die deutsche Zementindustrie somit sowohl über attraktive und moderne Einrichtungen zur Förderung der Zementherstellung und Betonbauweise als auch über eine schlagkräftige wirtschaftspolitische Interessensvertretung.

Der VDZ bietet darüber hinaus mit dem „Betonkreis“ eine Plattform, die auch von Vertretern des BDZ und der regionalen Marktfördergesellschaften genutzt wird, um die Betonbauweise bundesweit zu fördern. Erkenntnisse aus der gemeinnützigen Forschungstätigkeit des Instituts können somit zeitnah und effizient in der Praxis angewendet werden.

Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke e. V.“ (AiF)

Die AiF, zu deren Gründungsmitgliedern der VDZ gehört, fördert mit Mitteln, die das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) zur Verfügung stellt, die industrielle Gemeinschaftsforschung. Diese Forschung dient insbesondere der mittelständischen Industrie und setzt voraus, dass zu den Fördermitteln in mindestens gleicher Höhe eigene Forschungsmittel zur Verfügung gestellt werden. Der VDZ ist durch seinen Hauptgeschäftsführer im wissenschaftlichen Rat der AiF und durch mehrere Mitarbeiter in verschiedenen Gutachterausschüssen vertreten. Auch im Be-

richtszeitraum der Jahre 2003 bis 2005 hat der VDZ wieder maßgeblich Forschungsarbeiten mit Mitteln der AiF finanzieren können. Der AiF und dem BMWA sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Zementherstellung und Umweltschutz

Eine besonders intensive Zusammenarbeit bestand im Berichtszeitraum mit dem Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) und dem Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden (BBSE) und dessen Mitgliedsverbänden. Sowohl Mitarbeiter des Forschungsinstituts als auch Mitarbeiter von Mitgliedsunternehmen des VDZ arbeiten in Ausschüssen und Lenkungsgruppen dieser Verbände mit. Sie erörtern dort gemeinschaftlich übergeordnete Fragen der beteiligten Industrien. Hierzu zählen z. B. Fragen der Emissionsminderung, des Emissionshandels und der Chemikalienpolitik. Darüber hinaus arbeitet der VDZ traditionsgemäß aufgrund der breiten Palette seiner fachlichen Tätigkeitsfelder mit einer Reihe anderer Organisationen zusammen. Hierzu gehören der Verein Deutscher Ingenieure (VDI), der Deutsche Verein für Verbrennungsforschung (DVV), die Vereinigten Großkraftwerksbetreiber (VGB-Power-Tech), das Stahlinstitut VDEh, das Institut für Baustoff-Forschung FEhS, die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (ATV-DVWK) und die deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfachs (DVGW).

Mit dem Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie werden gemeinsame Lösungen insbesondere auf dem Gebiet der Aus- und Weiterbildung der Industriemeister der Fachrichtung Kalk und Zement gesucht. Eine intensive Zusammenarbeit mit dem Kalkverband besteht auch auf den Gebieten der Arbeitssicherheit, der Rohstoffsicherung, der CO₂-Emissionen und des Emissionshandels.

Auch in diesem Berichtszeitraum hat der VDZ wieder an einem intensiven fachlichen Meinungsaustausch mit zuständigen Ministerien auf Bundes- und Länderebene teilgenommen. Hierzu gehören auch das Bundesumweltamt, verschiedene Landesbehörden für Umweltschutz sowie die Deutsche Emissionshandelsstelle DEHSt.

Mitarbeiter des Instituts sind eingebunden in die Gremien des Deutschen Instituts für Normung (DIN). Hier sind in erster Linie die Normenausschüsse „Bau“ (NABau), „Wasser“ (NAW) und „Materialprüfung“ (NMP) sowie „Grundlagen des Umweltschutzes“ (NAGUS) zu nennen.

Zementanwendung

Der VDZ ist im Vorstand und in den Lenkungsgruppen des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb), in vielen Gremien des Instituts für Bautechnik (DIBt) sowie im Beirat und in verschiedenen Arbeitsausschüssen der Normenausschüsse Bauwesen und Materialprüfung vertreten. Darüber hinaus arbeitet er intensiv in der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen mit. Herr Prof. Thielen, langjähriger Geschäftsführer des VDZ, vertritt die Betonbauweise auch nach Eintritt in den Ruhestand als Vorsitzender des Normenausschusses Bauwesen (NABau) sowie als Stellvertretender Sprecher und als Obmann des Forschungsbeirats des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb).

Traditionsgemäß besteht eine enge und vertrauensvolle Zusammenarbeit mit den technisch-wissenschaftlichen Vereinen und Verbänden der Zementverbraucher. Hierzu gehören der deutsche Beton- und Bautechnikverein (DBV), der Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie (BTB) und der Bundesverband Deutsche Beton- und Fertigteilindustrie (BDB). Enge fachliche Kontakte bestehen auch zum Verband Deutscher Betoningenieure (VDB) und zur Deutschen Bauchemie. Der Kontaktausschuss mit dem BTB zu Fragen der Anwendung von Zementen in Transportbeton hat auch im vergangenen Berichtszeitraum eine gemeinsame Basis zu übergeordneten Fragen gesucht. Mit der Kies- und Sandindustrie und den Herstellern von Gesteinskörnungen wurde ein intensiver Austausch über die Verringerung der Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton gepflegt.

Gemeinschaftsarbeitskreis Beton

Neben der intensiven Begleitung der Normung sieht der Gemeinschaftsarbeitskreis Beton (GAK) seine Aufgabe unter anderem darin, gemeinsame Forschungsprojekte zu initiieren, zu begleiten und bei Bedarf finanziell zu unterstützen. Im Gemeinschaftsarbeitskreis sind der Bundesverband der deutschen Transportbetonindustrie (BTB), der deutsche Beton- und Bautechnikverein e.V. (DBV) und der Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) – unterstützt durch den Leiter der Abteilung Betoninformation des Bundesverbands der Zementindustrie (BDZ) – vertreten. Die Leitung des GAK, die jährlich wechselt, ging im Jahre 2005 vom DBV auf den VDZ über. Der GAK diskutiert zurzeit eingehend die Aufnahme der Fertigteilindustrie in den Arbeitskreis.

Ein vorrangiges gemeinsames Forschungsvorhaben ist die sachgerechte Herstellung und Verarbeitung von Sichtbeton. Mehrere Hochschulinststitute und das Forschungsinstitut der Zementindustrie beteiligen sich an dieser Forschung, die sowohl auf die Zusammensetzung des Sichtbetons eingeht, als auch seine Verarbeitung behandelt. Ein weiteres Thema ist der Sulfatwiderstand von Beton. Nachdem ein Sachstandsbericht mit finanzieller Unterstützung der Verbände fertig gestellt wurde und die bisher in der DIN 1045 getroffenen Festlegungen beibehalten werden konnten, werden jetzt von zwei Instituten zusammen mit dem FIZ praxisnahe Versuche im Rahmen der Arbeit des DAfStb durchgeführt. Die Untersuchungen werden von den Verbänden finanziert und eingehend begleitet.

Koordinierungsausschuss Betonzusatzmittel

Der Koordinierungsausschuss Betonzusatzmittel wurde neu belebt, nachdem einige deutsche Zusatzmittelfirmen von größeren internationalen Firmen übernommen wurden. Der Ausschuss, dem Fachleute aus der Zement- und Zusatzmittelindustrie angehören, wird zurzeit von der Deutschen Bauchemie geleitet. Die Obmannschaft wird jährlich wechseln.

Im Koordinierungsausschuss werden eingehend Fragen des Zusammenwirkens von Zement und Zusatzmitteln diskutiert. Zwei Themen werden zurzeit intensiv behandelt: Die Wirksamkeit von Nachbehandlungsmitteln und der Luftgehalt des Betons bei Einsatz von Fließmitteln. In letzter Zeit wurde bei Einsatz von Fließmitteln ein Rückgang des Luftgehalts unter 0,5 % festgestellt. Es ist zu klären, ob hierdurch ggf. der Frostwiderstand des Betons beeinträchtigt werden kann. Darüber hinaus will der Koordinierungsausschuss gemeinsame Positionen der Verbände zum Arbeitsschutz und zur Umweltvorsorge erarbeiten.

Es ist zusätzlich geplant, zu gegebener Zeit einen Workshop abzuhalten, in dem bestimmte Fachthemen für Interessenten der Mitgliedsunternehmen beider Verbände diskutiert werden sollen.

Hochschulen

Die Förderung der Hochschultätigkeit auf dem Gebiet der Bauforschung und der Bautechnik ist seit jeher ein Anliegen des VDZ. Auch im Berichtszeitraum stellte er wieder Mittel für Forschungsarbeiten an Hochschulinsttituten zur Verfügung. Er ist gemeinsam mit dem Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie an einer Stiftungsprofessur an der Technischen

Universität Clausthal beteiligt und fördert so den dortigen Lehrstuhl „Bindemittel und Baustoffe“. Ferner nehmen Mitarbeiter des Forschungsinstituts Lehraufträge an technischen Universitäten wahr.

Internationale Zusammenarbeit

CEMBUREAU ist der europäische Dachverband, in dem 23 nationale Zementverbände länderübergreifend zusammenarbeiten. Der VDZ bringt sich seit vielen Jahren mit seiner technisch-wissenschaftlichen Expertise in diese Gemeinschaftsarbeit ein. So helfen Erfahrungen, die der VDZ in der nationalen Forschungsarbeit gesammelt hat, Positionen der Zementindustrie im Umfeld der europäischen Gesetzgebung zu entwickeln. Im Berichtszeitraum standen in besonderem Maße Themen des Umweltschutzes und der CO₂-Minderung im Vordergrund. So stellt der europaweite Handel mit Emissionszertifikaten zu Beginn des Jahres 2005 die europäische Zementindustrie vor enorme Herausforderungen. Die gemeinsame Arbeit im CEMBUREAU hat an diesem Beispiel deutlich gemacht, dass Europa von einer Harmonisierung noch weit entfernt ist. Zu den weiteren Schwerpunkten der gemeinsamen europäischen Arbeit zählen die möglichen Auswirkungen der Zementverarbeitung auf die menschliche Gesundheit. Seit jeher widmet sich die Zementindustrie in besonderem Maße dem Schutz der eigenen Mitarbeiter und auch der Zementanwender. In der Auseinandersetzung um die europäische Richtlinie zur Chromatreduzierung von zementhaltigen Produkten konnte sich die Zementindustrie mit ihrer Forderung nach Lösungen, die sowohl technisch sinnvoll als auch wirtschaftlich sind, jedoch nicht durchsetzen.

In die europäische Normungsarbeit ist der VDZ seit vielen Jahren intensiv eingebunden. Im Vordergrund stehen dabei die Arbeiten des CEN/TC 51 (Zementnormung) und des CEN/TC 104 (Betonnormung) sowie des CEN/TC 229 für Betonfertigteile und des CEN/TC 178 für vorgefertigte Straßenbauerzeugnisse. In zunehmendem Maße gewinnt auch die baustoffübergreifende Normungsarbeit an Bedeutung. So sieht ein Mandatsentwurf der Kommission vor, dass zukünftig mögliche umweltrelevante Freisetzung aus Baustoffen einheitlich für alle Bauprodukte in der Normungsarbeit behandelt werden sollen. Die Arbeiten an der Normung von Zementen mit besonderen Eigenschaften haben im Berichtszeitraum dazu geführt, dass auch für Zemente mit niedriger Hydratationswärme eine harmonisierte Norm erarbeitet werden konnte. Gleiches gilt für

die Prüfnormen zur Bestimmung der Hydrationswärme. Offen ist nach wie vor die Verabschiedung einer Norm für Zemente mit hohem Sulfatwiderstand. Die unterschiedlichen nationalen Erfahrungen haben in Ermangelung eines aussagekräftigen Performance-Tests bislang eine einheitliche Vorgehensweise nicht erlaubt. Im TC 104 wurden im Berichtszeitraum die Arbeiten an der Flugaschenorm EN 450 erfolgreich fortgesetzt. Danach liegt nun eine europäische harmonisierte Flugaschenorm vor, die auch solche Flugaschen beinhaltet, die bei der Mitverbrennung von Abfällen im Steinkohlekraftwerk anfallen. Im CEN/TC 229 wurden die meisten der europäischen Produktnormen für Betonfertigteile abschließend beraten, so dass diese der Praxis nun zur Verfügung stehen. Das CEN/TC 178 hat mit dem Abschluss der europäischen Normen für Betonpflastersteine, -platten oder -bordsteine, die als DIN EN-Normen in Deutschland die bisherigen nationalen Normen ersetzt haben, seine Aufgabe erfüllt. Mitarbeiter des FIZ waren an den Arbeiten der drei CEN/TC-Gruppen beteiligt.

Der europäische Dachverband der Baustoffhersteller (CEPMC) ist auch für die Zementindustrie eine wichtige Plattform, um europäische Entwicklungen frühzeitig zu erkennen. Insbesondere in Fragen der Umweltauswirkungen von Baustoffen ergeben sich für alle Baustoffhersteller gemeinsame Interessen. Die Erfahrungen des VDZ fließen in die Arbeit des CEPMC ein. So sind Mitarbeiter des Forschungsinstituts unmittelbar in die Arbeit auf europäischer Ebene eingebunden. Auch der deutsche Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden arbeitet unter Mitwirkung des VDZ daran, deutsche Positionen für die Diskussion in Brüssel zu entwickeln.

Nach wie vor ist der VDZ eingebunden in wissenschaftliche Projekte, in denen sich Synergien durch eine länderübergreifende Zusammenarbeit ergeben. Hierzu zählt insbesondere die Mitarbeit im NIST-Konsortium, das sich seit vielen Jahren intensiv mit der rechnergestützten Modellierung der Zementhydratation befasst. Die Arbeiten sind bislang sehr erfolgreich und zeigen, dass sich wesentliche Eigenschaften des Zementsteins gut vorhersagen lassen. Hierzu zählen die Festigkeitsentwicklung und die Porosität, die zwei wesentliche Merkmale von Mörtel und Beton sind.

Im europäischen Forschungs- und Ausbildungskonsortium NANOCEM arbeitet der VDZ seit dessen Gründung mit. NANOCEM besteht aus 30 Partnerorga-

nisationen. Hierzu zählen Universitäten, nationale Forschungseinrichtungen und industrielle Partner. Mehr als 120 Forscher arbeiten in NANOCEM zusammen. Ziel ist es, die Kenntnisse über die Nano- und Mikrostrukturen des Zementsteins zu verbessern, um makroskopische Eigenschaften zementgebundener Baustoffe besser zu verstehen.

Über die Zusammenarbeit mit den zuvor genannten internationalen Organisationen hinaus pflegen der VDZ und sein Forschungsinstitut Kontakte zu weiteren europäischen und internationalen Organisationen. Mit dem National Council of Building Materials (NCB) in Indien hat der VDZ im Berichtszeitraum eine Kooperation begonnen. Im Vordergrund steht der Austausch über technisch-wissenschaftliche Fragen der Zementherstellung und -anwendung. Hierzu zählen insbesondere Fragen der Ressourcenschonung und der Emissionsminderung. Mit dem chinesischen Baustoffverband, der China Building Materials Industries Association (CBMIA), wurde eine Zusammenarbeit vereinbart, innerhalb derer ein Erfahrungsaustausch über alle relevanten Themen der modernen Zementherstellung stattfinden soll. Weitere Kontakte unterhält der VDZ zum Internationalen Normenausschuss (ISO), zur Fédération Internationale du Béton (fib) und zur Internationalen Vereinigung der Versuchs- und Forschungslaboratorien (RILEM), des Weiteren zum internationalen Institut für Flammenforschung (EFRF), zum amerikanischen Betoninstitut (ACI) und zur amerikanischen Gesellschaft für Prüfung und Werkstoffe (ASTM). Darüber hinaus bestehen Kontakte zur US-amerikanischen Portland Cement Association (PCA) sowie vielen Forschungseinrichtungen weltweit.

European Cement Research Academy

Nach ihrer Gründung im Jahr 2003 kann die European Cement Research Academy (ecra) auf nunmehr 2 Jahre erfolgreicher Tätigkeit zurückblicken. Der VDZ hatte seinerzeit die Initiative für diese europäische Forschungsplattform ergriffen, in der heute mehr als 30 einzelne oder verbundene Unternehmen mitarbeiten. In verschiedenen Seminaren und Workshops wurde über aktuelle Fragen der Zementherstellung und Betonbauweise berichtet. Die Mitarbeit in der ecra führt dazu, dass der VDZ und seine Mitgliedsunternehmen in starkem Maße in den internationalen Erfahrungsaustausch innerhalb der Zementindustrie eingebunden sind. In einem 4- bis 5-mal pro Jahr erscheinenden Newsletter

wird jeweils auf einzelne Fragen des Umweltschutzes oder der Verfahrenstechnik gezielt eingegangen.

Der Höhepunkt im Jahr 2004 war ohne Frage die erste internationale Konferenz über Innovation und zukünftige Entwicklungen in der Zementherstellung und der Betonbauweise. Hierzu kamen in Amsterdam internationale Experten zusammen, die über Fragen der Ressourcenschonung, der CO₂-Minderung sowie zukunftsweisende, zum Teil visionäre Entwicklungen berichteten. So wurden neueste Modelle der Zementhydratation vorgestellt. Auch wurde in einem Beitrag über das so genannte „Contour Crafting“ ein Ausblick auf eine mögliche Automatisierung der Bautechnik in der Zukunft gegeben.

Die ecra wird von einem Technical Advisory Board geleitet, in dem führende deutsche und europäische Zementhersteller vertreten sind. Hierzu gehören die Unternehmen Buzzi, Cemex, CRH, Dyckerhoff, HeidelbergCement, Italcementi, Schwenk und Titan Cement.

Vermittlung der Erkenntnisse ■

Die Arbeitsergebnisse der Ausschüsse, Arbeitskreise und Kommissionen sowie der Forschungstätigkeit des Instituts werden sowohl den Mitgliedern als auch der interessierten Fachwelt in zahlreichen Veröffentlichungen, Kolloquien, Seminaren, Vortragsveranstaltungen und Tagungen zugänglich gemacht. Ein Großteil der erarbeiteten Publikationen steht den VDZ-Mitgliedern und der Fachöffentlichkeit in elektronischer Form auf den Internet-Seiten des VDZ zur Verfügung oder kann über diese Seiten online bestellt werden.

Veröffentlichungen

Der Tagungsband zum fünften VDZ-Kongress „Verfahrenstechnik der Zementherstellung“, der im September 2002 in Düsseldorf stattgefunden hatte, wurde im Berichtszeitraum fertig gestellt und herausgegeben. Mit 68 Beiträgen aus 6 Fachgebieten und über 500 Seiten bietet der Tagungsband ein weites Spektrum praxisorientierter Veröffentlichungen. Zerkleinerungs- und Brenntechnik bilden einen besonderen Schwerpunkt, aber auch der Einsatz von Sekundärstoffen, Informationsmanagement im Betrieb und Nachhaltigkeit im Zusammenhang mit der Zementherstellung kommen nicht zu kurz. Um der internationalen Leserschaft gerecht zu werden, wurde der Kongressband in englischer Sprache publiziert.



Teilnehmer an der Fachtagung Zementverfahrenstechnik am 19.02.2004 während einer Pause im Foyer des Forschungsinstituts



Das Auditorium im Vortragssaal des Forschungsinstituts bei der Fachtagung Emissionshandel am 06.04.2004

Die „Umweltdaten der deutschen Zementindustrie“, mit denen eine umfassende, laufend aktualisierte Dokumentation umweltrelevanter Daten der deutschen Zementindustrie vorliegt, wurden auf Basis der in den Jahren 2002 und 2003 erhobenen Daten fortgeschrieben, so dass mittlerweile bereits die 6. Ausgabe vorliegt. Ebenso fortgesetzt wurde der CO₂-Monitoring-Report, dessen 7. Ausgabe mit Berichtszeitraum 2000 bis 2003 im Februar 2005 erschien.

In den VDZ-Mitteilungen, die dreimal jährlich erscheinen, wurde wie gewohnt zeitnah über die Tätigkeiten des VDZ und seines Forschungsinstituts informiert. Im Berichtszeitraum waren zahlreiche Beiträge den Entwicklungen auf dem Gebiet des EU-weiten CO₂-Emissionshandels gewidmet. Die Aufstellung des deutschen nationalen Allokationsplanes, die Umsetzung der EU-Richtlinie in deutsches Recht und die daran anschließende Phase der Antragstellung auf Zertifikatszuteilung sorgten für großen Informationsbedarf und damit für besonderes Leserinteresse. Darüber hinaus wurde wie üblich über aktuelle Forschungsarbeiten im FIZ berichtet und über Ergebnisse aus anderen Forschungseinrichtungen informiert.

In der Schriftenreihe der Zementindustrie, die in erster Linie Dissertationen und Habilitationsschriften enthält, erschienen während des Berichtszeitraums zwei neue Hefte. 2003 erschien Heft 64 „Herstellung dauerhafter zementgebundener Oberflächen im Trinkwasserbereich: Korrosionsanalyse und technische Grundanforderungen“ von P. Boos. 2004 folgte die Arbeit von J. Rickert „Zum Einfluss von Langzeitverzögerern auf der Basis von Phosphonsäure auf die Hydratation einzelner Klinkerphasen,

Portlandzementklinker und Portlandzement“ als Heft 65.

Jeweils als Beilage zu den VDZ-Mitteilungen stellte der Arbeitskreis „Arbeitsicherheit“ die Sicherheitsmerkmblätter Nr. 94 bis 99 sowie die Sicherheitsprüflisten Nr. 74 bis 79 zusammen. Des Weiteren haben der Arbeitskreis „Betriebsverhalten von Vorcalcineranlagen“ und der Arbeitskreis „SO₂-Minderung / Stoffkreisläufe“ jeweils ein Merkblatt mit den Ergebnissen ihrer Arbeiten erstellt. Beide Merkblätter sind online auf den VDZ-Internetseiten abrufbar. Die VDZ-Lehrbriefe, die im Berichtszeitraum grundlegend überarbeitet und wesentlich erweitert wurden, sind inzwischen nicht nur in gedruckter Form, sondern auch auf CD-ROM erhältlich.

Zahlreiche Aufsätze wurden in den führenden Fachzeitschriften veröffentlicht. Vorrangig zu nennen sind hier für den Bereich Zementchemie und Verfahrenstechnik die Zeitschrift „Cement International“, die auch als Organ für den VDZ fungiert, und für den Bereich Betontechnik die Zeitschrift „beton“. Die unter dem Namen „Betontechnische Berichte“ in der Zeitschrift „beton“ erscheinenden Veröffentlichungen aus dem FIZ werden darüber hinaus jahrgangsweise zusammengefasst. Im Frühjahr 2004 erschien die 29. Ausgabe dieser Betontechnischen Berichte, die die Jahre 2001 bis 2003 abdeckt.

Tagungen

Die Arbeitssausschüsse des VDZ veranstalten regelmäßig Fachgespräche und Fachtagungen, um über ihre aktuelle Arbeit zu informieren. Der nun schon seit mehr als 30 Jahren jährlich veranstaltete „Betonkreis“, zu dem die Betontechnologen der Zement- und Transportbetonindustrie

sowie der Bauwirtschaft ins FIZ geladen werden, fand im Berichtszeitraum am 23.03.2004 sowie am 15.03.2005 statt. Neben der im üblichen 2-Jahres-Turnus am 19.02.2004 veranstalteten Fachtagung „Zementverfahrenstechnik“ fand am 06.04.2004 eine Fachtagung „Emissionshandel“ statt, die wegen der besonderen Aktualität auf großes Interesse stieß. Mit mehreren Workshops zu den Themen „CO₂-Datenerhebung“ und „Einsatz der RISA-Software zur Antragsstellung auf Zuteilung von CO₂-Emissionszertifikaten“ wurde dem besonderen Informationsbedarf im Bereich Emissionshandel zusätzlich Rechnung getragen.

Aus- und Weiterbildung

Die Aus- und Weiterbildung und der Wissenstransfer gehören zu den wichtigsten Aufgaben des VDZ. Seit nunmehr 47 Jahren werden gemeinsam mit dem Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie Industriemeister-Lehrgänge „Kalk/Zement“ durchgeführt. Die Lehrgänge, die in eine theoretische und eine praktische Ausbildung untergliedert sind, dauern 18 Monate und schließen mit der Prüfung vor der IHK Düsseldorf ab. Der 21. Lehrgang endete im März 2005. Neben der Aus- und Weiterbildung der Meister werden im Rahmen des VDZ-Bildungswerks auch die Leitstandsfahrer gezielt geschult. Die Weiterbildung von Leitstandsfahrern zu Produktionssteuerern besteht aus einem praktischen Teil, der in den Werken absolviert wird, und einem theoretischen Teil. Dieser theoretische Unterricht wird vom Forschungsinstitut durchgeführt und umfasst einen Zeitraum von 7 Wochen. In 2003 und 2004 fanden der 10. und 11. Lehrgang statt, der 12. Lehrgang begann im April 2005. Schwerpunkte dieser Ausbildung sind die Unterrichtung in den Fächern

Brenn-, Umwelt- und Aufbereitungstechnik sowie die Arbeit mit dem Ofen- und Mühlensimulator SIMULEX.

Für die Schulung von Produktionsmitarbeitern wurden darüber hinaus bislang 31 Lehrbriefe zu unterschiedlichen Themen des Zementherstellungsprozesses erstellt, die neben der gedruckten Fassung für den Einsatz am Rechner auch auf CD-ROM erhältlich sind.

Wie in den Jahren zuvor bot der VDZ auch im Berichtszeitraum wieder eine Reihe ein- oder mehrtägiger Seminare und Workshops auf den Gebieten Zementproduktion, Qualitätssicherung, Umweltschutz, Betonausgangsstoffe, Betonherstellung und Leistungsfähigkeit von Beton an.

Wissenschafts-Stiftung der Zementindustrie

Die am 2. Juni 1995 ins Leben gerufene „Gerd-Wischers-Stiftung“ soll die Aus- und Weiterbildung wissenschaftlicher Nachwuchskräfte insbesondere in der Zementindustrie fördern. Die Stiftung verfügt über ein Vermögen von EUR 1 533 875 (DM 3 000 000). Von den Zinserträgen können jeweils 4 bis 5 Stipendien vergeben werden. In der Berichtszeit wurden 2 Dissertationen zu den Themen „Wirkungsmechanismen von schwindreduzierenden Zusatzmitteln“ und „Einfluss des Mahlsystems auf die Eigenschaften von Portlandzementen und Hüttensandmehlen“ gefördert. Eine laufende Forschungsarbeit auf dem Gebiet der Betontechnik befasst sich mit den Wirkungsmechanismen von Fließmitteln auf der Basis von Polycarboxylatether (PCE). Darüber hinaus konnte ein Stipendium mit einer Laufzeit von einem halben Jahr zum Abschluss einer Diplomarbeit gewährt werden sowie ein weiteres kurzzeitiges Stipendium zum Abschluss einer Forschungsarbeit zum Thema „Einfluss der Zusammensetzung der Porenlösung auf das Sorptionsverhalten von Fließmitteln“.

Forschungsinstitut der Zementindustrie ■

Zur Durchführung seiner Aufgaben unterhält der VDZ das Forschungsinstitut der Zementindustrie. Die Institutsleitung legt die Aufgaben im Einzelnen in Abstimmung mit dem Technisch-Wissenschaftlichen Beirat und mit Zustimmung des Vorstands fest. Mit seinem Forschungsinstitut verfügt der VDZ über eine renommierte und international anerkannte wissenschaftliche Einrichtung. Diese deckt alle Bereiche der Zementherstellung und -anwendung

ab. Das Institut verfügt über einen modernen Gerätepark und ist auch für anspruchsvolle Grundlagenuntersuchungen optimal ausgestattet. Das Forschungsinstitut kann auch für Dritte tätig werden, z. B. indem es öffentlich-rechtliche Aufgaben als amtlich bekannt gegebene Emissionsmessstelle oder als amtlich anerkannte Prüfanstalt wahrnimmt. Darüber hinaus bietet das Forschungsinstitut in zunehmende Maße gutachterliche und beratende Unterstützung in fachlichen Angelegenheiten im Rahmen des Vereinszwecks an.

Fachlich gliedert sich das Institut in 5 Abteilungen, die der Institutsleitung unmittelbar unterstellt sind. Die allgemeinen Dienste umfassen die Bereiche Verwaltung, Information und Datenverarbeitung mit Rechenzentrum, Bibliothek, Dokumentations- und Verlagsaufgaben sowie die mechanische und elektronische Werkstatt. Die Laboratorien des Forschungsinstituts sind akkreditiert, gleichzeitig verfügt das Institut über ein zertifiziertes Qualitäts- und Umweltmanagement-System. Das Organigramm auf Seite 18 zeigt die Aufgabenbereiche der einzelnen Abteilungen und der Zertifizierungsstelle für Managementsysteme, FIZ-Zert.

Mitarbeiterstab

Zum Zeitpunkt der Berichterstattung sind 132 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter im Forschungsinstitut beschäftigt; davon verfügen 43 über eine weitergehende Ausbildung an einer Universität, Technischen Hochschule oder Fachhochschule. Das Institut stellt zurzeit insgesamt 3 Ausbildungsplätze in unterschiedlichen Bereichen zur Verfügung. Im Berichtszeitraum haben 3 Auszubildende zum Chemielaboranten ihre Lehre im Institut erfolgreich abgeschlossen.

Institutsgebäude

Das Hauptgebäude des Forschungsinstituts wurde 1955/56 im Düsseldorfer Norden errichtet. Der steigende Personalstand in den 60er Jahren machte eine Erweiterung erforderlich. Es wurde ein 7-geschossiger Erweiterungsbau geplant, von dem 1964/65 die 4 unteren Geschosse und erst 1992/94 die restlichen Stockwerke erstellt wurden. Die 2004 vollzogene engere Verzahnung des VDZ mit seinem Schwesterverband BDZ (Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e. V.) machte es erforderlich, Büroräume für die Mitarbeiter des bis dahin in Köln ansässigen Büros des Bundesverbands zur Verfügung zu stellen. Hierzu konnte das 7. Stockwerk des Instituts in Düsseldorf genutzt werden. Es war erst in den Jahren 1999/2000 unter anderem mit

dem Ziel, zusätzliche Büro-, Sitzungs- und Schulungsräume zu erhalten, ausgebaut worden. Eine im Sommer 2004 durchgeführte Umbaumaßnahme im Erdgeschoss des Instituts ermöglichte auch die Unterbringung der Hausdruckerei des BDZ.

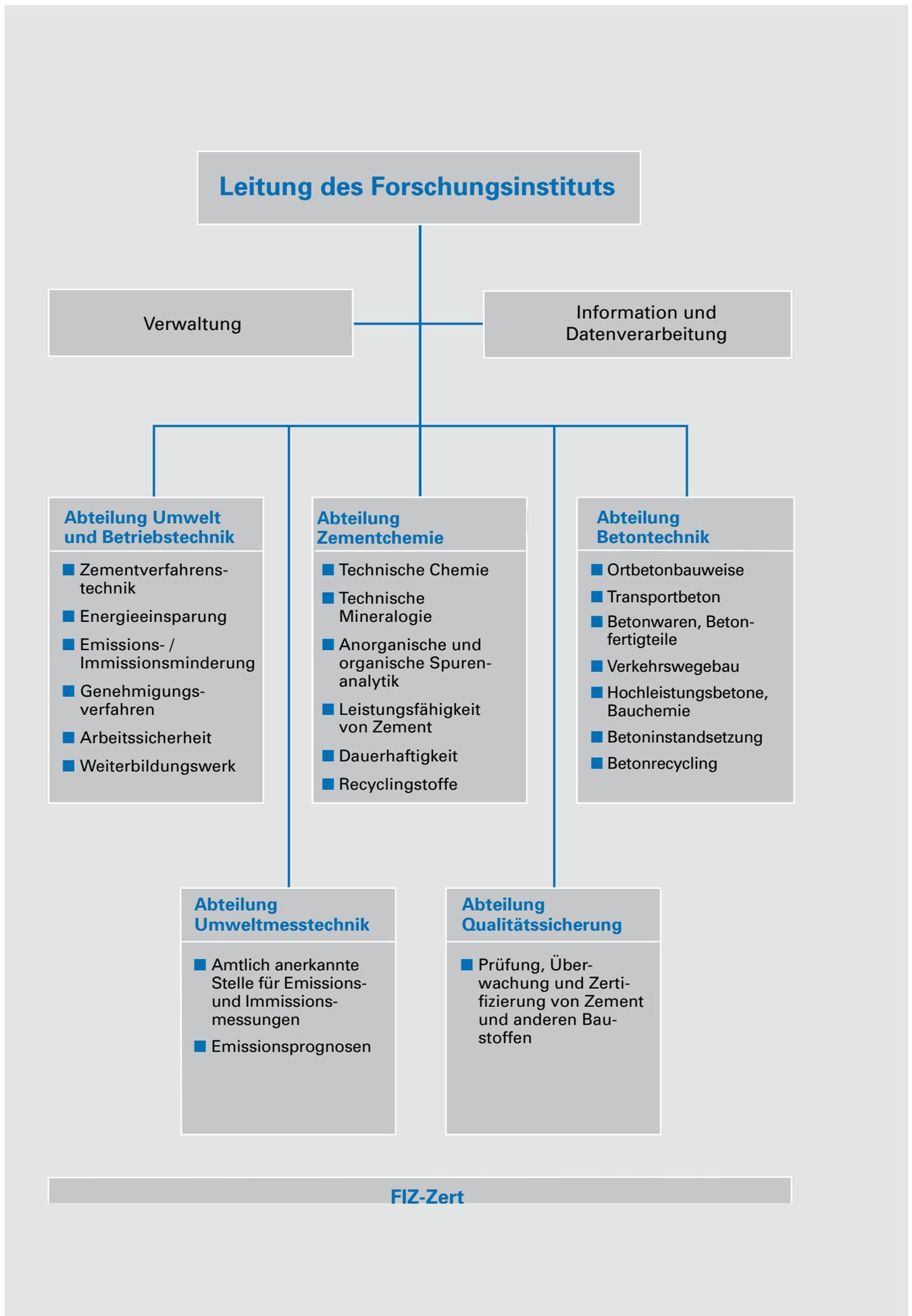
Für das Forschungsinstitut ist es von großer Wichtigkeit, die Leistungsfähigkeit der Labors laufend dem aktuellen Stand der Technik und Wissenschaft anzupassen. Die aufwendigen Maßnahmen zur zentralen Klimatisierung der Labors und der Lagerräume für Probekörper sowie die räumliche Trennung besonders sensibler Laborbereiche von der nasschemischen Analytik, die in den Jahren 2001 bis 2003 durchgeführt worden waren, haben sich bewährt. Dies gilt ebenso für die Einrichtung eines abgeschlossenen Gefahrstofflagers. Im Berichtszeitraum waren keine größeren Baumaßnahmen erforderlich; nur die im Rahmen der laufenden Instandhaltung anfallenden Installations- und Renovierungsarbeiten mussten durchgeführt werden.

Insgesamt verfügt das Forschungsinstitut heute über rund 40 000 m² umbauten Raums. Bei einer Gesamtnutzfläche von rund 8 400 m² entfallen 3 445 m² auf das Hauptgebäude und 2 915 m² auf den 7-geschossigen Erweiterungsbau. Die restlichen 2 040 m² umfassen die 1-geschossigen Laboratorien und die Untergeschossräume sowie ein Wohnhaus für FIZ-Mitarbeiter.

Labor-Informations- und Managementsystem (LIMS)

Zu Beginn des Jahres 2000 wurde – als erster Schritt zunächst nur in der Abteilung Zementchemie – ein Labor-Informations- und Management-System (LIMS) in Betrieb genommen. Das System ermöglicht eine hohe Transparenz der Abläufe in den angeschlossenen Bereichen. Gleichzeitig gewährleistet es für alle an einem Projekt Beteiligten den problemlosen Zugriff auf benötigte Daten. Im Berichtszeitraum wurden in der Abteilung Zementchemie jährlich rund 8 000 Proben mit im Mittel rund 10 Prüfungen pro Probe untersucht. Nach der erfolgreichen Einführung des LIMS im Chemielaborbereich wurde das System erweitert und hinsichtlich seiner Performance vollständig überarbeitet.

Nach dieser Überarbeitung wurde das LIMS im Januar 2005 auch in den Abteilungen Betontechnik, Umwelt und Betriebstechnik und Umweltmesstechnik eingeführt. Das System ermöglicht nun die Eingabe aller anfallenden Laborergebnisse der angeschlossenen Abteilungen. Hierdurch soll eine wesentliche Effizienzsteige-



Leitung des Forschungsinstituts

Schneider, Dr. (Vorsitzender); Thielen, Prof. Dr.-Ing. (bis 31.7.2004)

Verwaltung
Patz

Information und Datenverarbeitung
Klimek

Abteilung Umwelt und Betriebstechnik

Hoenig, Dr.-Ing.

Hoppe, Dr.
Klein, Dipl.-Ing.
Müller-Pfeiffer, Dr.-Ing., OI
Schäfer, Dr., OI

Abteilung Zementchemie

Puntke, Dr. / Baetzner, Dr. (ab 1.4.2005)

Lipus, Dr.
Schäfer, Dr.-Ing., Frau
Schneider, Dipl.-Min.
Spanka, Dr., OI
Sylla, Dr., OI
Wassing, Dr.

Abteilung Betontechnik

Siebel, Dr.-Ing.

Alonso Junghanns, Dr.-Ing., Frau
Bokern, Dipl.-Ing.
Breit, Dr.-Ing., OI
Eickschen, Dipl.-Ing.
Feldrappe, Dipl.-Ing.
Hauer, Dr.
Müller, Dr.-Ing., OI
Neck, Dipl.-Ing., OI
Severins, Dipl.-Ing., Frau

Abteilung Umweltmesstechnik

Oerter, Dr.-Ing.

Heydemann, Dipl.-Ing.
Küllertz, Dipl.-Ing.
Söllerböhmer, Dr.
Stinsky, Dipl.-Ing.
Zunzer, Dr.-Ing., Frau

Abteilung Qualitätssicherung

Sybertz, Dr.-Ing.

Fischer, Dipl.-Ing.
Grimm, Dipl.-Ing.
Loewe, Dipl.-Ing.
Völkening, Dipl.-Ing., Frau

FIZ-Zert

Zertifizierungsstelle für Managementsysteme (Qualität und Umwelt)

Sybertz, Dr.-Ing.; Hoenig, Dr.-Ing.; Oerter, Dr.-Ing.

zung und Transparenz bei der Abwicklung von Projekten während der Durchführung von Laboruntersuchungen im FIZ erzielt werden. Dies betrifft insbesondere die abteilungsübergreifende Nutzung des LIMS und die Zuordnung der Kostenstellen zu den Projekten mit den dazugehörigen Aufträgen und Proben.

Durch die hohe Verfügbarkeit des Systems – nahezu an jedem Arbeitsplatz – können alle an einem Projekt beteiligten Mitarbeiter ständig die für sie relevanten Informationen abfragen, Ergebnisse einfügen und Berichte erstellen. Die Projektleitung kann sich ständig einen Überblick über den aktuellen Bearbeitungsstand verschaffen. Zur Abfrage detaillierter, für besondere Auswertungszwecke zusammengestellter Ergebnisse, auch aus verschiedenen Projekten, steht ein spezieller Reportgenerator zur Verfügung, der die im LIMS enthaltenen Abfragemöglichkeiten individuell erweitert.

Datenverarbeitung / Internet

Das Forschungsinstitut verfügt über eine durchgehend homogene IT-Infrastruktur. Sämtliche relevanten Gebäudeteile sind vernetzt. Seit 2003 werden erfolgreich die Microsoft Windows Betriebssysteme (Windows 2000 bzw. XP auf den Clients und Windows 2003 auf den Servern) eingesetzt. Die Anwendungen auf Client-Seite stammen hauptsächlich von Microsoft. Spezialsoftware und Individualentwicklungen, die insbesondere bei Messdatenerfassungssystemen eingesetzt werden, runden das Spektrum ab.

Die Ende 2004 vollzogene Zusammenlegung des BDZ (Standort Köln) mit dem VDZ in Düsseldorf bringt, bezogen auf die EDV und die Betreuung der beiden Netzwerke, enorme Kostenvorteile mit sich. Die Konsolidierung beider Netzwerke wird mit Hochdruck vorangetrieben. Die BDZ-Standorte in Berlin und Erkrath sind über das Internet direkt angebunden, so dass die Betreuung auch dieser Standorte direkt von Düsseldorf aus erfolgen kann. Insgesamt werden 13 Server und 140 EDV-Arbeitsplätze betreut.

Die flächendeckende Vernetzung über den Standort Düsseldorf hinaus gewährleistet, dass jeder Mitarbeiter von seinem Arbeitsplatz aus alle relevanten Informationen direkt nutzen kann. Hierzu gehören vor allem die interne Literaturdatenbank, zahlreiche Nachschlagewerke, die zentral in digitaler Form vorgehalten werden, aber selbstverständlich auch das Internet / Intranet. Das Labor-Management-In-

formationssystem LIMS wird erfolgreich abteilungsübergreifend eingesetzt. Im Internet ist der VDZ unter der Adresse www.vdz-online.de präsent. Ein nur für registrierte Nutzer zugängliches Extranet ergänzt das Informationsangebot auf der Homepage, deren vollständige Überarbeitung für das Jahr 2005 geplant ist.

Informationsstelle – Bibliothek

Die Informationsstelle stellt den Mitarbeitern des Forschungsinstituts für ihre Arbeit eine umfangreiche Literatursammlung zur Verfügung, die nach Absprache auch von Außenstehenden genutzt werden kann. Der Bestand beläuft sich gegenwärtig auf rund 41 000 Bände; darin sind in etwa 13 150 Monographien, 18 700 Serienbände, 36 150 Patente, 6 500 Normen sowie zahlreiche Forschungsberichte, Jahresberichte und Sonderdrucke enthalten.

Zurzeit dienen 131 laufend gehaltene Zeitschriften der aktuellen Information. Die wissenschaftlichen Mitarbeiter des Hauses werten diese Fachzeitschriften aus; wichtige Aufsätze werden in die VDZ-Literaturdatenbank, die aktuell mehr als 46 000 Dokumente umfasst, aufgenommen. Die Einträge umfassen eine bibliographische Beschreibung, die das jeweilige Medium mit Eigenschaften wie z.B. Verfasser und Titel beschreibt (formale Erfassung). Zusätzlich erfolgt eine inhaltliche Erschließung anhand des angepassten CEMBUREAU-Thesaurus, der die Inhalte eines Mediums mit einigen aussagekräftigen Worten umschreibt (sachliche Erschließung). Für die Klassifizierung und Aufstellung des Bestands der Informationsstelle wird weiterhin die ZKG-Systematik verwendet.

Die Nacherfassung des Zettelkatalogs mit den Beständen vor 1985 ist weiter vorangetrieben worden, so dass eine Recherche nach älteren Medien bereits heute möglich ist. Die vollständige Erfassung ist allerdings sehr zeitaufwendig, so dass hierin eine der zentralen Aufgaben der Informationsstelle für den kommenden Berichtszeitraum liegen wird. Neben der Nacherfassung der älteren Bestände wird im Rahmen der Zusammenführung von BDZ und VDZ die Bibliothek des BDZ in den VDZ-Literaturbestand eingearbeitet. Sie umfasst ca. 500 Bücher, die formal und sachlich zu erschließen sind. Sie werden den Mitarbeitern von BDZ und VDZ damit strukturiert zugänglich gemacht. Weiterhin sind die Sammlungen Radon (ca. 1 000 Dokumente), Reißrahmen (ca. 200 Dokumente) und Hochfester Beton (ca. 630 Dokumente) gänzlich erschlossen und

digitalisiert in die VDZ-Literaturdatenbank aufgenommen worden.

Die Bibliothek hat das Ziel, den Mitarbeitern des Hauses die benötigten Informationen unabhängig von ihrem Trägermedium zeitnah zu beschaffen und zur Verfügung zu stellen. Hierbei gilt besonderes Augenmerk digitalen Informationen, da sich Zugriffs- und Durchlaufzeiten hierdurch erheblich verkürzen lassen. Beispielsweise ist der institutsinterne Zeitschriftenumlauf auf digitale Inhaltsverzeichnisse, die in Form einer PDF-Datei ins Intranet eingespielt werden, umgestellt worden, was die Durchlaufzeiten wesentlich verkürzt hat.

Eine weitere zentrale Aufgabe der Informationsstelle neben der Bestandspflege und Informationsbeschaffung ist die Unterstützung der Mitarbeiter des Hauses bei der Nutzung des Internets. Zu diesem Tätigkeitsfeld gehört sowohl die Pflege von Linklisten für einen strukturierten Zugang zu benötigten Quellen wie auch die Erschließung von neuen Zugangswegen für schon bekannte Dienste, z.B. die Nutzung elektronischer Lieferdienste, um die Lieferzeiten zu verringern.

Die Bibliothek ist an der Herausgabe aller Veröffentlichungen des Forschungsinstituts beteiligt. Sie ist außerdem für die Koordination des Versands der VDZ-Publikationen verantwortlich und unterhält einen umfangreichen Schriftentausch mit vielen in- und ausländischen Forschungsstellen. Auf diese Weise erhält die Bibliothek auch die schwer zugängliche „Graue Literatur“ aus ihren Sammelgebieten Betontechnik, Zementchemie, Verfahrenstechnik und Umweltschutz. Durch intensive Leihverkehrsverbindungen zu anderen Bibliotheken wird Literatur beschafft, die die eigenen Sammelgebiete ergänzt.

Akkreditierung / Zertifizierung

Das Institut hat im Berichtszeitraum seine Aktivitäten verstärkt, sich sowohl national als auch international vermehrt markt- und dienstleistungsorientiert auszurichten. Dazu gehört auch eine hohe Effizienz und Transparenz der Abläufe im Institut, insbesondere in den Laboratorien. Aus diesem Grund war vor einigen Jahren ein schlankes, EDV-gestütztes Managementsystem eingeführt worden, das einen minimalen Verwaltungsaufwand gewährleistet. Dieses System wird regelmäßig einer externen Prüfung nach den 4 Nachweisnormen ISO 9001, ISO 14001, ISO 17025 und EN 45011 im Rahmen von Akkreditierungsbegutachtungen und Zertifizierungsaudits unterzogen.

Die Akkreditierung der Laboratorien des Forschungsinstituts nach ISO 17025 umfasst insgesamt rund 300 Prüfmerkmale mit rund 520 Merkmal-Verfahrens-Kombinationen. Damit erfüllt das Forschungsinstitut in vollem Umfang die Anforderungen, die von nationalen und internationalen Auftraggebern an entsprechend qualifizierte Mess- und Prüfinstitute gestellt werden. Auch im Rahmen der Tätigkeit im gesetzlich geregelten Bereich erlangt die privatrechtliche Akkreditierung eine zunehmende Bedeutung als Qualifikationskriterium.

Als weitere Schritte bei der LIMS-Implementierung (siehe auch S. 17) sind die Einbindung der Abteilung Qualitätssicherung, der Prüfmittelverwaltung und der Kostenrechnung mit interner Rechnungs- und Angebotserstellung geplant.

Dienstleistungen

Das Forschungsinstitut kann auch für Dritte tätig werden, indem es gutachterliche oder beratende Dienstleistungen in fachlichen Angelegenheiten im Rahmen des Vereinszwecks erbringt. Hierzu gehört auch die Wahrnehmung öffentlich-rechtlicher oder privatrechtlicher Aufgaben, z.B. durch die Arbeit der Überwachungsgemeinschaft als Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle, als Umweltmessstelle oder als Zertifizierungsstelle für Management-Systeme (Umwelt und Qualität). Die Dienstleistungen werden getrennt von den ideellen Arbeiten der Gemeinschaftsforschung des VDZ erbracht. Die einzelnen Projekte werden separat abgerechnet und unterliegen nach innen wie nach außen strengen Vertraulichkeitsanforderungen. Beratungsdienstleistungen werden auf Grundlage feststehender Tagessätze angeboten und in Rechnung gestellt. Standardisierte Tätigkeiten werden als Festpreisdienstleistungen erbracht.

Betontechnik

Neben den Forschungstätigkeiten im Bereich der Betontechnik werden von den Mitarbeitern des FIZ zunehmend auch Auftragsuntersuchungen und gutachterliche Stellungnahmen durchgeführt. Im Bereich der Auftragsuntersuchungen lagen die Schwerpunkte unter anderem bei folgenden Untersuchungen:

- Bestimmung der Hydratationswärmeentwicklung nach dem Langavant-Verfahren (DIN EN 196-9), mit dem Differentialcalorimeter sowie den im FIZ entwickelten Prüfapparaturen für umfangreichere Mörtel- und Betonserien

- Bestimmung des C-Wertes
- Bestimmung von Luftporenkennwerten in Festbeton (DIN EN 480-11)
- Bestimmung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands
- Untersuchungen zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)
- Prüfung der Reaktivität verschiedener Gesteinskörnungen
- Beurteilung von Betonzusammensetzungen hinsichtlich der Gefahr einer schädigenden AKR (Performance-Prüfverfahren)
- Bestimmung mechanischer Kenngrößen von Beton, Mörtel und Estrich als auch von deren Verformungsverhalten
- Bestimmung von rheologischen Kennwerten an Zementleimsuspensionen
- Untersuchungen zur Beurteilung des Korrosionsverhaltens von Zusatzmitteln (nach DIN V 18998)
- Bestimmung des Eindringverhaltens wassergefährdender Stoffe (DafStb-Richtlinie)
- Bestimmung der Gesamtporosität, der Porenvolumenverteilung und der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Quecksilberintrusion (DIN 66133)
- Bestimmung von Chloridmigrationskoeffizienten und Carbonatisierungsverhalten für Dauerhaftigkeitsbeurteilungen
- Schleifverschleiß (DIN 52108).

Gutachterliche und beratende Tätigkeiten wurden beispielsweise in folgenden Themengebieten durchgeführt:

- Frischbetoneigenschaften
- Minderfestigkeiten von Beton
- Dauerhaftigkeit des Betons
- Schäden in Trinkwasserbehältern
- Beschichtung von Trinkwasserbehältern
- Rissbildung im Beton
- Oberflächeneigenschaften von Beton
- Carbonatisierung und Bewehrungskorrosion
- Eigenschaften von Mörteln
- Wirkung salzhaltiger, betonaggressiver Wässer auf die Bausubstanz
- Rezepturanpassung von Betonen
- Entwicklung von selbstverdichtendem Beton für lokal verfügbare Ausgangsstoffe
- Unverträglichkeiten von Betonzusatzmitteln und Zement
- Beurteilung von Bodenplatten, die den Vorschriften des Wasserhaushaltsgesetzes unterliegen
- Beurteilung von Rissverpressungsmaßnahmen
- Verunreinigungen von Werk trockenmörteln.

Umweltmessstelle

Die Umweltmessstelle des Forschungsinstituts, vertreten durch die Abteilung Umweltmesstechnik, steht der Zementindustrie sowie anderen Industrien bei der Erfüllung ihrer umweltrechtlichen Auflagen bereits seit vielen Jahren als Dienstleister zur Verfügung. Das Angebot umfasst dabei sämtliche umweltrelevanten Bereiche. Aufgrund der amtlichen Bekanntgabe als eine offiziell anerkannte, unabhängige Messstelle nach §§ 26, 28 BImSchG, §§ 26, 28 der 13. BImSchV, § 10 der 17. BImSchV sowie Nr. 3.2 TA Luft (seit Oktober 2002 Nr. 5.3) ist das FIZ auch befugt, Messungen im gesetzlich geregelten Bereich durchzuführen. Damit können die unabhängigen und gerichtsfesten Messungen auch zur Kontrolle der Einhaltung von Auflagen aus Genehmigungsbescheiden herangezogen werden.

Die Schwerpunkte der Tätigkeiten liegen in folgenden Bereichen:

- Planung und kompetente Durchführung von Emissionsmessungen nach BImSchG an industriellen Anlagen
- Erarbeitung von Messplänen unter Berücksichtigung der einschlägigen VDI-Richtlinien
- Emissionsmessungen und Probenahmen von luftgetragenen Schadstoffen (z.B. Stickoxide, Spurenelemente, Stäube, organische Kohlenwasserstoffe, PCDD/F etc.)
- Ermittlung von Geräuschemissionen und -immissionen
- Ausarbeitung von Lärminderungskonzepten und Werkslärmkarten
- Ermittlung von Emissionen und Immissionen durch Sprengerschütterungen
- Überprüfung des ordnungsgemäßen Einbaus und der Funktion und der Kalibrierung von kontinuierlich arbeitenden Messgeräten
- Begutachtung von Messstellen.

Die Umweltmessstelle verfügt über ein interdisziplinäres Team von Ingenieuren, Naturwissenschaftlern und Laboranten mit langjähriger Praxiserfahrung. Die im Jahr 2002 erfolgreich abgeschlossene Akkreditierung auf Basis der internationalen Norm DIN EN ISO/IEC 17025 (ehemals DIN EN 45001) stellt für die Messstelle eine wesentliche Grundlage für die Akquisition von Aufträgen auch im Ausland dar. Aufgrund des immer engeren Zusammenwachsens der Industrie sowie der Vereinheitlichung von Umweltauflagen ist ein vermehrter Bedarf an qualifizierten Messungen im Ausland festzustellen. Aufgrund der langjährigen Erfahrung und der speziel-

len Kenntnisse über die Zementherstellung ist die Umweltmessstelle diesbezüglich ein interessanter Partner für die Industrie. Dieser Ausbau der internationalen Aktivitäten geht nicht zu Lasten der Qualität der im Inland erbrachten Leistungen. Vielmehr hat die Umweltmessstelle – basierend auf einer eingehenden Kundenbefragung – aktuell eine Verbesserungskampagne gestartet, die es zum Ziel hat, die eigene Qualität und damit die Zufriedenheit der Kunden weiter zu steigern.

Umwelt und Betriebstechnik

Neben den Forschungsarbeiten in den Themenbereichen Umweltschutz und Verfahrenstechnik bietet das Forschungsinstitut, vertreten durch seine Abteilung Umwelt und Betriebstechnik, Dienstleistungen für Zementunternehmen an. Die Schwerpunkte der Umwelt und Betriebstechnik sind unter anderem gutachterliche und beratende Tätigkeiten. Seit vielen Jahren unterstützt das Forschungsinstitut die Mitgliedswerke des VDZ bei der Durchführung von Genehmigungsverfahren. Dies betrifft insbesondere folgende Arbeiten:

- Management von Genehmigungsverfahren
- Unterstützung bei Behördengesprächen, unter anderem bei neuen Regelungen im Umweltrecht
- Erstellung von Gutachten (Schornsteinhöhenberechnungen, Emissionsprognosen, Immissionsprognosen, etc.)
- Durchführung von Umweltverträglichkeitsuntersuchungen.

Im technischen Bereich kann die Abteilung Umwelt und Betriebstechnik die Zementwerke unterstützen durch

- technische Beratung
- Optimierung des Betriebs von Ofen- und Mahlanlagen
- Optimierung des Brennstoffeinsatzes
- Minderung von Emissionen (NO_x, SO₂, Staub, Quecksilber etc.)
- Durchführung von Prozessmessungen an Ofen- und Mahlanlagen
- Durchführung von Kreislaufuntersuchungen
- Durchführung von Energiebilanzen und Maßnahmen zur Verringerung des Energieverbrauchs.

Im Rahmen der verstärkten europäischen Ausrichtung des Forschungsinstituts werden diese Leistungen zunehmend auch international angeboten. Dabei kann auf langjährige Erfahrungen aus internationalen Projekten (z. B. EU-Forschungsprojekte) zurückgegriffen werden.

Überwachungsgemeinschaft des VDZ

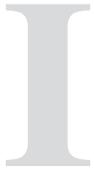
Zu den traditionellen Aufgaben des Vereins Deutscher Zementwerke gehört die Prüfung, Überwachung und Zertifizierung von Zement und zementartigen Bindemitteln zur Erfüllung der Schutzziele der Landesbauordnungen bzw. im Sinne des Bauproduktengesetzes. Die Überwachungsgemeinschaft des VDZ ist entsprechend für Zement, hydraulische Bindemittel, Betonzusatzstoffe und -mittel

und bestimmte daraus hergestellte Zubereitungen sowohl im Geltungsbereich von Normen als auch von bauaufsichtlichen Zulassungen durch die zuständigen Bauaufsichtsbehörden als Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle (PÜZ-Stelle) anerkannt. Die verschiedenen Aktivitäten der Überwachungsgemeinschaft des VDZ im Berichtszeitraum sind in Kapitel IV ausführlich dargestellt.

Zertifizierungsstelle für Managementsysteme FIZ-Zert

Die Zertifizierungsstelle für Managementsysteme des Forschungsinstituts ist seit Juni 1998 durch die TGA (Träbergemeinschaft für Akkreditierung) akkreditiert. Unternehmen können die Leistungen von FIZ-Zert unabhängig von Standort, Mitgliedschaft in Verbänden und sonstigen Einschränkungen in Anspruch nehmen (siehe Kapitel IV).

FIZ-Zert war ursprünglich für die Zertifizierung von Qualitätsmanagementsystemen nach DIN EN ISO 9001 eingerichtet worden, um mögliche Synergien mit der gesetzlich geforderten Produktzertifizierung nutzen zu können. Seit 2003 ist FIZ-Zert auch für die Zertifizierung von Umweltmanagementsystemen nach ISO 14001 akkreditiert. Im Jahr 2004 hat FIZ-Zert erstmals auch Verifizierungen von CO₂-Emissionen gemäß Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz (TEHG) an insgesamt 28 Zementwerksstandorten durchgeführt.



Verfahrenstechnik der Zementherstellung

Die verfahrenstechnische Forschung ist vor allem darauf gerichtet, den Energieverbrauch und Arbeitskrachteinsatz bei der Zementherstellung sowie die Qualität und Gleichmäßigkeit des Zements zu optimieren und die Emissionen unter Beachtung der Wirtschaftlichkeit zu vermindern. Einen wesentlichen Schwerpunkt der Untersuchungen in den vergangenen Jahren bildete die Optimierung des Einsatzes von Sekundärbrennstoffen sowie die Untersuchung der Auswirkung des Sekundärbrennstoffeinsatzes auf den Brennbetrieb und die Umwelt. Der Anteil der Sekundärbrennstoffe am Gesamtenergiebedarf der deutschen Zementindustrie ist inzwischen auf ca. 38 % (2003) angestiegen. Dies bedeutet, dass viele Öfen mit hohen Substitutionsraten von z.T. über 60 % betrieben werden.

Seit der BSE-Krise im Jahr 2000 hat die deutsche Zementindustrie in großem Maß Tiermehl energetisch verwertet. Das Forschungsinstitut hat umfangreiche Untersuchungen zu den Auswirkungen des Tiermehleinsatzes auf die Produktqualität sowie auf Ofenbetrieb und Emissionen durchgeführt. Betriebstechnisch standen vor allem Auswirkungen auf Chlorkreisläufe und das Verhalten des Phosphats in der Ofenanlage im Vordergrund. Emissionsseitig waren vor allem mögliche Auswirkungen auf die NO_x -Emissionen von Interesse.

Ebenfalls im Zusammenhang mit dem Einsatz von Sekundärbrennstoffen stehen die Arbeiten eines VDZ-Arbeitskreises, der sich intensiv mit den Auswirkungen der Vorcalciniertechnik und des Sekundärbrennstoffeinsatzes auf Verschleiß und Standfestigkeit feuerfester Materialien beschäftigt hat. Diese Arbeiten werden inzwischen fortgeführt und auf die gesamte Ofenanlage erweitert.

Die Bestrebungen, den Klinkerbrennprozess auch modelltechnisch abzubilden und Simulationsrechnungen zur Optimierung von Ofenanlagen bzw. zur Untersuchung wissenschaftlicher Fragestellungen zu nutzen, wurden im Berichtszeitraum fortgeführt. Das im Forschungsinstitut vorliegende Prozessmodell für den gesamten Klinkerbrennprozess wurde um die Elemente des äußeren Kreislaufs sowie um die Möglichkeit, auch das Verhalten von Chlor und Schwefel sowie Alkalikreisläufe zu simulieren, erweitert. Nach entsprechender Validierung mit experimentellen Ergebnissen steht das Modell nunmehr z.B. zur Auslegung oder Optimierung von Bypasssystemen zur Verfügung.

Durch Untersuchungen an technischen und halbtechnischen Mahl- und Sichtenanlagen wurde vor allem den Auswirkungen von getrennter bzw. gemeinsamer Mahlung auf die Korngrößenverteilung der ermahlenden Zemente nachgegangen. Ein neuer Arbeitsschwerpunkt im Bereich der mechanischen Verfahrenstechnik liegt im Vergleich verschiedener Mahlsysteme zur Zementherstellung. Im Fokus des Interesses stehen unterschiedliche Produkteigenschaften bei gleicher Korngrößenverteilung, die letztlich auf die möglicherweise unterschiedlichen Mahltechnologien zurückzuführen sind. Hierzu werden Untersuchungen an halbtechnischen Mahl- und Sichtenanlagen im Forschungsinstitut sowie bei verschiedenen Anlagenherstellern durchgeführt.



Energieverbrauch

Ofenanlagen

Die genehmigte Ofenkapazität der deutschen Zementindustrie hat sich im Berichtszeitraum von 132 820 t/d (2002) auf 130 020 t/d in 2004 verringert. Die Betriebsgenehmigung einer Ofenanlage ist ausgelaufen. Die Gesamtzahl der genehmigten Ofenanlagen sank dadurch von 70 auf 69 Anlagen. In Deutschland werden heute fast nur noch Ofenanlagen betrieben, die nach dem Trockenverfahren bzw. Halbtrockenverfahren arbeiten. Darüber hinaus bestehen Genehmigungen für 8 Schachtofen. Die durchschnittliche Ofenleistung der Drehrohröfen stieg geringfügig von 2 106 auf 2 112 t/d. **Tafel I-1** gibt einen Überblick über den Stand der verfügbaren Ofenanlagen. Demnach entfallen 99,1 % der genehmigten Gesamtkapazität auf Anlagen mit Zyklon- bzw. Rostvorwärmern. Der Anteil der Zyklonvorwärmanlagen hat mit 88,3 % im Jahr 2004 (bezogen auf die Kapazität) weiter zugenommen. Die Anzahl der Vorcalcineranlagen ist mit 11 gleich geblieben. Hiervon verfügen 8 Anlagen über eine Tertiärluftleitung. Aufgrund der im Vergleich größeren Ofenleistungen repräsentieren die Vorcalcineranlagen mehr als ein Viertel der installierten genehmigten Klinkerkapazität der deutschen Zementwerke.

Die Auslastung war im Jahr 2002 mit 56 % deutlich geringer als im Langzeitmittel. Im Jahr 2003 stieg die Auslastung wieder auf 61 %, was vor allem auf verstärkte Klinkerexporte zurückzuführen ist. Insgesamt liegen auch diese Auslastungsgrade deutlich unter dem Langzeitmittel. Den Angaben zur Auslastung liegt eine angenommene Verfügbarkeit der Ofenanlagen von 320 Tagen pro Jahr zugrunde.

Brennstoffenergiebedarf

Brennstoffenergie wird bei der Zementherstellung im Wesentlichen für das Brennen des Zementklinkers aufgewendet. In geringerem Umfang wird thermische Energie für die Trocknung von weiteren Zementhauptbestandteilen, wie z. B. Hüttensand, eingesetzt. Für die Herstellung von Zementklinker mit seinen charakteristischen Eigenschaften werden die Rohstoffe, vor allem Kalksteinmergel und Ton, bei Temperaturen von 1 400 bis 1 450 °C gebrannt. Aufgrund der Produkthanforderungen und des dafür notwendigen Hochtemperaturprozesses gehört die Zementindustrie zu den energieintensiven Branchen in der Bundesrepublik. Aus diesem Grund ist die Zementindustrie seit jeher bemüht, ihren Energieverbrauch und damit die Brennstoff-

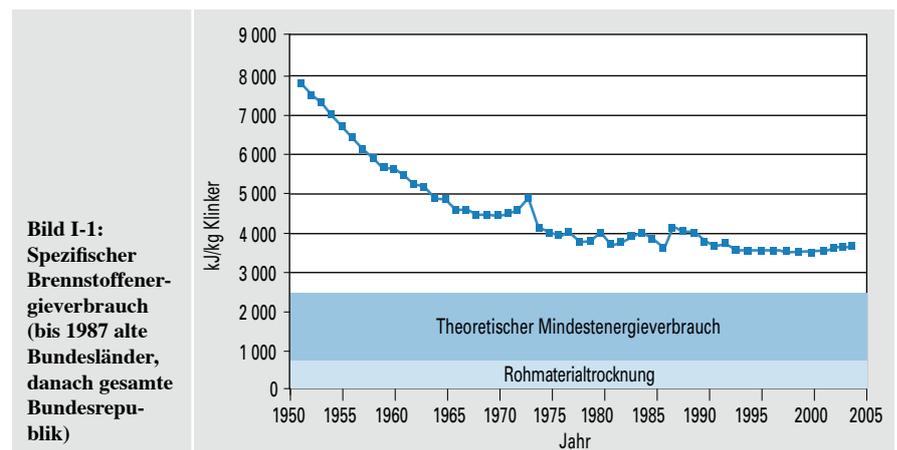
Tafel I-1: Anzahl und Kapazität der Öfen mit Betriebsgenehmigung in der Bundesrepublik Deutschland in den Jahren 2002 bis 2004

	Stand: 01.01.2003			Stand: 01.01.2004			Stand: 01.01.2005		
	Anzahl	Kapazität		Anzahl	Kapazität		Anzahl	Kapazität	
		t/d	%		t/d	%		t/d	%
Öfen mit Zyklonvorwärmer	46	116 550	88,4	45	114 750	88,3	45	114 750	88,3
Öfen mit Rostvorwärmer	16	14 070	10,7	16	14 070	10,8	16	14 070	10,8
Schachtofen	8	1 200	0,9	8	1 200	0,9	8	1 200	0,9
Summe	70	131 820	100	69	130 020	100	69	130 020	100
mittlere Ofenkapazität in t/d	Drehöfen	2 106		2 112		2 112			
	Schachtofen	150		150		150			
Klinkerproduktion ¹⁾ (Jahr) in Mio. t/a	(2002)		(2003)		(2004)				
Auslastung ²⁾ in %	56		61		3)				

¹⁾ nach CO₂-Monitoring

²⁾ angenommene Verfügbarkeit 320 d/a

³⁾ noch nicht verfügbar



energiekosten zu senken. **Bild I-1** zeigt die Entwicklung des spezifischen thermischen Energieverbrauchs der Zementindustrie von 1950 bis 2003. Ab dem Jahr 1987 sind darin die neuen Bundesländer enthalten. Wie das Bild verdeutlicht, ist der Brennprozess in den deutschen Zementwerken heute so weit optimiert, dass verfahrenstechnische Maßnahmen keine nennenswerten weiteren Minderungen mehr erwarten lassen.

Bezogen auf die Tonne Zement ist es der deutschen Zementindustrie dagegen in den letzten Jahren gelungen, ihren spezifischen Energieeinsatz deutlich zu verringern. Wie die jährlich durch das Forschungsinstitut erhobenen Daten der Zementunternehmen zum Energieverbrauch und zur Produktion zeigen, ist diese Verminderung in den Berichtsjahren nur zu einem geringen Anteil auf verfahrenstechnische Maßnahmen zurückzuführen. Von wesentlich größerer Bedeutung ist die verstärkte Produktion

von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen. Wie aus **Tafel I-2** hervorgeht, ist es der deutschen Zementindustrie auf diese Weise gelungen, in den vergangenen 16 Jahren ihren spezifischen Brennstoffenergieverbrauch bezogen auf die hergestellte Zementmenge von 3 510 kJ/kg Zement auf 2 740 kJ/kg Zement zu senken. Im gleichen Zeitraum sank der Klinkeranteil im Zement von ca. 86 % auf 76 %.

Diese Entwicklung ist vor dem Hintergrund der Selbstverpflichtung zum Klimaschutz zu sehen, die die deutsche Zementindustrie im Jahr 1995 gemeinsam mit anderen Branchen der deutschen Wirtschaft eingegangen ist. Mit dieser Selbstverpflichtung leistet sie ihren Beitrag zur Reduzierung der klimarelevanten CO₂-Emissionen. Demnach strebt die Zementindustrie an, ihren spezifischen Brennstoffenergieeinsatz von 1987 bis 2005 um 20 % zu senken.

Die Struktur der in der deutschen Zementindustrie eingesetzten Brennstoffe hat sich in den vergangenen Jahren weiter stetig verändert. Der gesamte Brennstoffeinsatz ist seit 1987, unter anderem wegen des starken Produktionsrückgangs, von 119,9 auf 91,3 Mio. GJ/a im Jahr 2003 gesunken. Dies entspricht einer absoluten Verminderung um 23,9 %. Der Anteil der Sekundärbrennstoffe stieg, wie aus **Bild I-2** hervorgeht, im Berichtszeitraum weiter an und beträgt nunmehr 38,3 % (2003) gegenüber 23,0 % im Jahr 1999. Durch den verstärkten Einsatz von Sekundärbrennstoffen wurden im Berichtszeitraum vorwiegend Steinkohle sowie in geringerem Maße Braunkohle und Petrolkoks substituiert. Der Verbrauch von schwerem Heizöl sank von 5,9 Mio. GJ/a in 1999 auf 2,7 Mio. GJ/a in 2003.

Die Aufschlüsselung der Sekundärbrennstoffe für die Jahre 2000 und 2003 zeigt, dass die Rolle der traditionellen Sekundärbrennstoffe Altreifen und Altöl relativ zu anderen Sekundärbrennstoffen abgenommen hat. Wie **Tafel I-3** zeigt, ist der Einsatz von Altreifen mit knapp 250 000 t/a fast konstant geblieben, während die eingesetzte Altölmenge von 140 000 t/a im Jahr 2000 auf 116 000 t/a im Jahr 2003 zurückging. Deutlich gesteigert wurde der Einsatz von Fraktionen aus Industrie- und Gewerbeabfällen von 372 000 t/a in 2000 auf 626 000 t/a in 2003. Auch der Einsatz aufbereiteter Fraktionen aus Siedlungsabfall wurde auf 155 000 t/a gesteigert. Der Einsatz von Tiermehlen und -fetten begann im Jahr 2000 nach der BSE-Krise und wurde auf 452 000 t/a im 2003 gesteigert. Es ist allerdings absehbar, dass diese Mengen in Zukunft nicht mehr im selben Maß zur Verfügung stehen werden.

Elektrischer Energieverbrauch

Elektrische Energie wird bei der Zementherstellung vor allem für die Rohmaterialaufbereitung (etwa 35 %), zum Brennen und Kühlen des Klinkers (ca. 22 %) und für die Zementmahlung (ca. 38 %) aufgewendet. **Bild I-3** zeigt die Entwicklung des elektrischen Energieverbrauchs der deutschen Zementwerke im Zeitraum von 1950 bis 2003. Der langjährige Anstieg des elektrischen Energieverbrauchs konnte nach der Wiedervereinigung Deutschlands gestoppt werden. In den Folgejahren konnte sogar eine gewisse Verringerung erzielt werden, die im Jahr 2003 mit 99,5 kWh/t ein neues Minimum erreichte.

Tafel I-2: Absoluter und spezifischer Brennstoffenergieverbrauch

Jahr	Brennstoffenergieverbrauch	
	absolut 10 ⁶ GJ/a	spezifisch kJ/kg Zement
1987	119,9	3 510
1990	109,5	3 200
1994	102,9	3 000
1995	102,8	3 000
1996	97,6	2 995
1997	99,3	2 975
1998	100,7	2 905
1999	102,3	2 800
2000	99,3	2 835
2001	89,8	2 790
2002	85,8	2 790
2003	91,3	2 740
2005 ¹⁾	--	2 800 ²⁾

¹⁾ Zieljahr der Selbstverpflichtung von 1995

²⁾ Im Rahmen der Selbstverpflichtung von der deutschen Zementindustrie prognostizierter Wert im Zieljahr

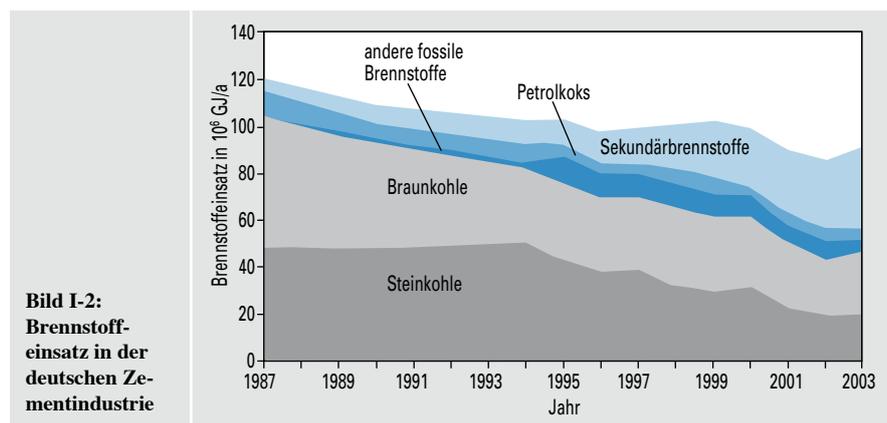


Bild I-2: Brennstoffeinsatz in der deutschen Zementindustrie

Tafel I-3: Einsatz von Sekundärbrennstoffen in der deutschen Zementindustrie

Sekundärbrennstoff	2000 1 000 t/a	2003 1 000 t/a
Reifen	248	247
Altöl	140	116
Fraktionen aus Industrie- / Gewerbeabfällen, davon:	372	626
Zellstoff, Papier und Pappe		156
Kunststoff		177
Verpackungen		9
Abfälle aus der Textilindustrie		15
Sonstige		269
Tiermehl und -fette	¹⁾	452
Aufbereitete Fraktionen aus Siedlungsabfällen	¹⁾	155
Altholz	79	48
Lösungsmittel	31	48
Bleicherde	23	20
Klärschlamm	-	4
Sonstige wie:	176	17
Ölschlamm		
organische Destillationsrückstände		

¹⁾ in 2000 unter Sonstige

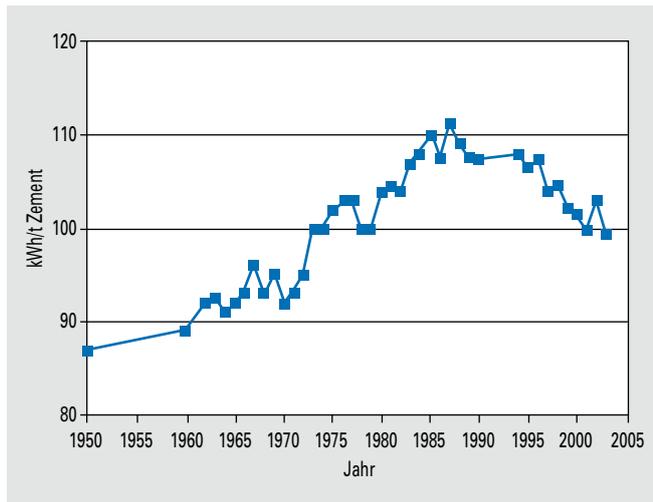


Bild I-3: Spezifischer elektrischer Energieverbrauch (bis 1987 alte Bundesländer, danach gesamte Bundesrepublik)

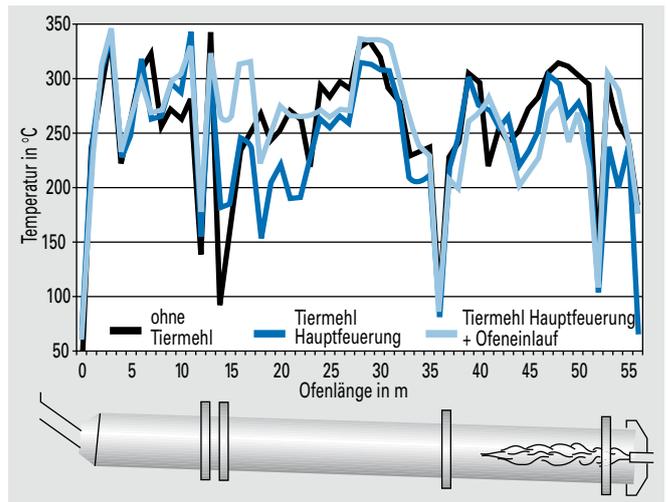


Bild I-4: Mittlere Ofenwandtemperatur bei unterschiedlichem Einsatz von Tiermehl

Zemente mit weiteren Hauptbestandteilen neben Klinker, wie Hüttensand oder Kalkstein, erfordern einen höheren Mahlergieaufwand, da sie bei gleicher Qualität feiner aufgemahlen werden müssen. Andererseits wird der entsprechende elektrische Energiebedarf für die Herstellung des substituierten Klinkers (Rohmaterialaufbereitung, Brennprozess) eingespart. Der Einsatz energieeffizienter Mühlentypen, wie z. B. der Gutbett-Walzenmühle, hat sich in der Zementindustrie weitgehend durchgesetzt. Da die Gebrauchseigenschaften der Zemente aus diesen Mühlen jedoch nicht denen aus herkömmlichen Kugelmühlen entsprechen, ist in der Regel nach wie vor eine Nachmahlung in Kugelmühlen erforderlich. Somit kann das Potential der Energieeinsparung weiterhin nicht in vollem Umfang nutzbar gemacht werden. Auch eine getrennte Aufmahlung der verschiedenen Hauptbestandteile und deren anschließende Mischung in Mischanlagen scheint im Rahmen der betriebsüblichen Möglichkeiten keine signifikanten Minderungen zu erlauben.

Anlagenbetrieb

Auswirkungen des Tiermehleinsatzes auf den Betrieb von Drehofenanlagen

Bei jedem Brennstoffwechsel sind die Auswirkungen auf den Ofenbetrieb, die Emissionen und die Zementeigenschaften zu bedenken. Im Rahmen eines von der AiF geförderten Forschungsvorhabens wurden die Auswirkungen des Tiermehleinsatzes auf den Betrieb von Drehofenanlagen und die Zementeigenschaften (siehe Kapitel III) untersucht. Tiermehle enthalten neben Phosphaten auch höhere

Chlor- und Schwefelgehalte sowie höhere Stickstoffgehalte, die die Stoffkreisläufe in der Ofenanlage und die NO_x -Emissionen beeinflussen können. Außerdem sind Tiermehle im Vergleich zu Kohlenstaub deutlich grobkörniger, so dass der vollständige Abbrand eines Tiermehlpartikels länger dauern kann als bei einem feingemahlten Kohlepartikel.

An 3 Ofenanlagen wurden umfangreiche Betriebsuntersuchungen mit und ohne Tiermehleinsatz durchgeführt. Auch wurde der Zugabeort des Tiermehls variiert. Bei 2 der untersuchten Ofenanlagen handelt es sich um klassische Zyklonvorwärmeröfen. Die dritte Drehofenanlage ist als Vorcalcinierringanlage ausgeführt. Bei den Ofenversuchen wurde der Einfluss des Tiermehleinsatzes auf den Brennstoffenergiebedarf, die Feuerungsbedingungen, die NO_x -Emissionen sowie die Chlor- und Schwefelkreisläufe untersucht. Der Tiermehleinsatz hatte an allen 3 Ofenanlagen nur geringen Einfluss auf den Brennstoffenergiebedarf. Bei allen 3 Ofenanlagen wurden während des Tiermehleinsatzes geringfügig höhere Rohgastemperaturen nach Wärmetauscher gemessen als ohne Tiermehleinsatz. Dies führte zu geringfügig höheren Abgasverlusten, die jedoch teilweise durch andere Effekte überlagert wurden (z. B. geringere Wandwärmeverluste infolge Ansatzbildung im Ofen und höhere Sauerstoffgehalte im Rohgas bei einzelnen Betriebseinstellungen). Insofern hat der Tiermehleinsatz nicht generell einen erhöhten Brennstoffenergiebedarf zur Folge.

An allen 3 Ofenanlagen bewirkte der Tiermehleinsatz in der Hauptfeuerung offensichtlich eine längere Flamme im Drehofen.

Hierauf deuten einerseits erhöhte Temperaturen im Ofeneinlaufbereich bzw. im gesamten Vorwärmer hin. Andererseits wurde an einer Ofenanlage auch eine veränderte Temperaturverteilung auf der Ofenwand festgestellt. In Bild I-4 ist die mittlere Ofenwandtemperatur dieser Ofenanlage über der Ofenlänge bei verschiedenen Brennstoffeinstellungen dargestellt. Die schwarze Kurve stellt die mittlere Ofenwandtemperatur bei Einsatz von Steinkohlenstaub, flugfähigen Fraktionen aus Gewerbeabfällen (Fluff) und Altöl dar. Die dunkelblaue Kurve zeigt das Temperaturprofil bei Einsatz von 2,5 t/h Tiermehl in der Hauptfeuerung. Dabei wurde die Zugabemenge von Fluff gegenüber der ersten Messung konstant gehalten; statt dessen wurden die Massenströme von Kohlenstaub und Altöl reduziert. Bei Tiermehleinsatz zeigten sich tendenziell geringere Temperaturen im Bereich des Ofenauslaufs bei gleichzeitig etwas höheren Temperaturen im Bereich des Ofeneinlaufs. Die hellblaue Kurve stellt die Temperaturverteilung auf der Ofenwand bei Einsatz von 1,8 t/h Tiermehl in der Hauptfeuerung und 0,7 t/h im Ofeneinlauf dar. Die übrigen Brennstoffe blieben demgegenüber unverändert. Die Ofenwandtemperaturen im Bereich des Ofenauslaufs sanken dadurch weiter ab. Im Ofeneinlaufbereich wurden höhere Wandtemperaturen gemessen. Auch die mikroskopischen Bilder von Klinkeranschliffen bestätigen, dass sich bei Tiermehleinsatz eine längere Vorkühlzone ausbildete.

An 2 der 3 Drehofenanlagen hatte der Tiermehleinsatz in der Hauptfeuerung eine Erhöhung der NO_x -Emissionen bis zu 20% zur Folge. Tiermehle enthalten vergleichsweise hohe Gehalte an Brennstoff-Stick-

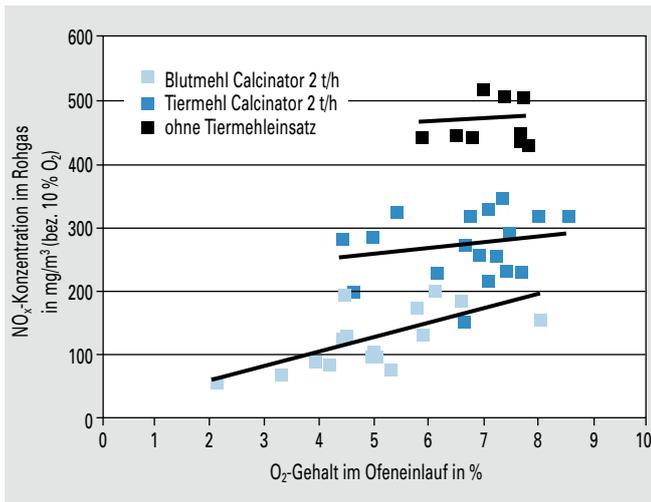


Bild I-5: Einfluss des Tiermehleinsatzes auf die NO_x -Konzentration im Rohgas einer Drehofenanlage

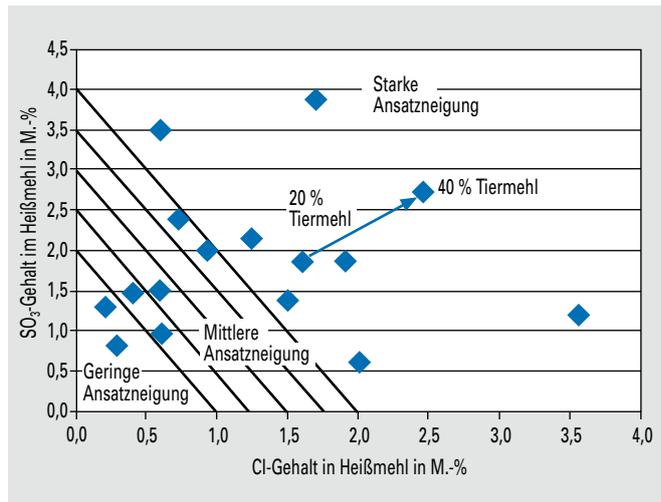


Bild I-6: Einfluss des Tiermehleinsatzes auf die Ansatzneigung einer Drehofenanlage

stoff, der bei Verbrennung je nach Sauerstoffangebot in der Sinterzone zu einer NO -Bildung beitragen kann. Die Erfahrungen aus anderen Zementwerken zeigen, dass eine solche Erhöhung der NO_x -Emissionen jedoch vermieden werden kann, wenn die Einstellung der Feuerung entsprechend angepasst wird. Der Einsatz von Tiermehl im Ofeneinlauf oder im Calcinator führte dagegen zu einer Verringerung der NO_x -Emissionen gegenüber dem Einsatz anderer Brennstoffe. Besonders niedrige NO_x -Emissionen ergaben sich, wenn Blutmehl anstatt von Tiermehl im Ofeneinlauf oder Calcinator eingesetzt wurde. Analog zu den Erfahrungen mit dem Einsatz von Altfreien im Ofeneinlauf bewirkt die Verbrennung des Tiermehls in diesem Bereich der Ofenanlage lokal nah- oder unterstöchiometrische Bedingungen, die zur Unterdrückung der NO -Bildung aus dem Tiermehl oder sogar zur Minderung des NO aus der Hauptfeuerung führen können.

An einer Vorcalcineranlage wurde die Zugabe von Tiermehl im Calcinator untersucht. In **Bild I-5** sind die NO_x -Konzentrationen im Rohgas (bezogen auf 10 % O_2) der Ofenanlage in Abhängigkeit vom Sauerstoffangebot im Ofeneinlauf dargestellt. Aus dem Bild wird ersichtlich, dass der eingesetzte Brennstoff einen maßgeblichen Einfluss auf die im Calcinator ablaufende NO -Bildung bzw. den NO -Abbau hat. Bei der Brennstoffart spielen der Flüchtigengehalt, der Gehalt an Brennstoff-Stickstoff, die Bindungsform des Brennstoff-Stickstoffs und die Feinheit des Brennstoffs eine entscheidende Rolle. Bei einem hohen Flüchtigengehalt werden während der Pyrolyse des Brennstoffs größere Mengen an Kohlen-

wasserstoffradikalen und NH_3 -Verbindungen freigesetzt, durch die NO abgebaut werden kann. Weist der Brennstoff zudem höhere Stickstoffgehalte auf, so werden bei der Pyrolyse deutlich größere Mengen an NH_3 -Verbindungen freigesetzt, die den NO -Abbau ebenfalls begünstigen. Blutmehl hat mit ca. 18 M.-% einen deutlich höheren Stickstoffgehalt als Tiermehl mit rd. 9 M.-%. Daher ist davon auszugehen, dass bei Blutmehleinsatz bei der Pyrolyse deutlich größere Mengen von NH_3 -Verbindungen und Kohlenwasserstoffen als Zwischenprodukte entstehen, die über eine SNCR-Reaktion zu einer NO -Minderung führen. Die Verbrennung von Brennstoffen mit geringem Flüchtigengehalt (z. B. Kohlenstaub) läuft deutlich langsamer ab. Dadurch wird der zur Verfügung stehende Sauerstoff nicht so schnell verbraucht und der NO -Abbau fällt geringer aus. Zudem weist Kohlenstaub mit ca. 0,6 M.-% nur geringe Stickstoffgehalte auf, so dass die Bildung von NH_3 -Verbindungen und somit der NO -Abbau deutlich geringer ist als beim Einsatz von Tiermehl oder Blutmehl.

Durch den Tiermehleinsatz erhöhten sich in allen untersuchten Fällen vor allem die Chlor- und in geringerem Umfang auch die Schwefeleinträge in die Ofenanlage. Da während der Versuche die Bypass-Systeme mit gleich bleibender Bypassrate betrieben wurden, hatte der erhöhte Chloreintrag auch einen Anstieg der Chlorgehalte im Heißmehl zur Folge. Besonders starke Erhöhungen der Stoffkreisläufe wurden an der Ofenanlage festgestellt, bei der der Tiermehleinsatz von ursprünglich 20 % auf 40 % der Feuerungswärmeleistung gesteigert wurde. Wie aus **Bild I-6** hervorgeht, erhöhte sich durch den 40%igen Tiermehl-

einsatz der Chlorgehalt im Heißmehl innerhalb eines Tages gegenüber 20%igem Tiermehleinsatz von 1,6 M.-% auf 2,5 M.-%. Zudem hatte die längere Flamme bei erhöhtem Tiermehleinsatz auch eine veränderte Schwefeleinbindung im Klinker zur Folge. Trotz des Anstiegs der Chlor- und Schwefelgehalte im Heißmehl war die Ansatzbildung im Vorwärmer während des Versuchszeitraums jedoch beherrschbar. Im Dauerbetrieb würde man auf die Erhöhung des Chlorgehalts im Heißmehl mit einer Anpassung der Bypassrate reagieren, um das Niveau des Chlorkreislaufs auf das übliche Niveau abzusenken.

Modellierung des Klinkerbrennprozesses

Zur Auswahl geeigneter Sekundärbrennstoffe und zur Bewertung der möglichen Einsatzmengen an einer Ofenanlage kann ein im Forschungsinstitut der Zementindustrie entwickeltes verfahrenstechnisches Simulationsmodell genutzt werden. Ebenso kann der Betrieb eines Teilgasabzugs am Ofeneinlauf zur Begrenzung von Chlorkreisläufen zwischen Ofen und Vorwärmer mit diesem Programm gerechnet und optimiert werden. Das Modell beschreibt den gesamten Klinkerbrennprozess vom Eintrag der Rohmaterialien und der Brennstoffe bis zum Austritt des Klinkers aus dem Kühler und dem Ofenabgas aus dem Kamin. Es besteht aus Einzelmodellen für die Zyklone des Vorwärmers, den Calcinator, den Bypass, den Drehrohrföfen und den Rost- bzw. Satellitenkühler sowie neuerdings auch für die Anlagenteile des äußeren Kreislaufs (**Bild I-7**), den Verdampfungskühler, die Rohmühle, den Vorabscheider und den Staubfilter. Diese Module sind rechnerisch miteinander verknüpft und

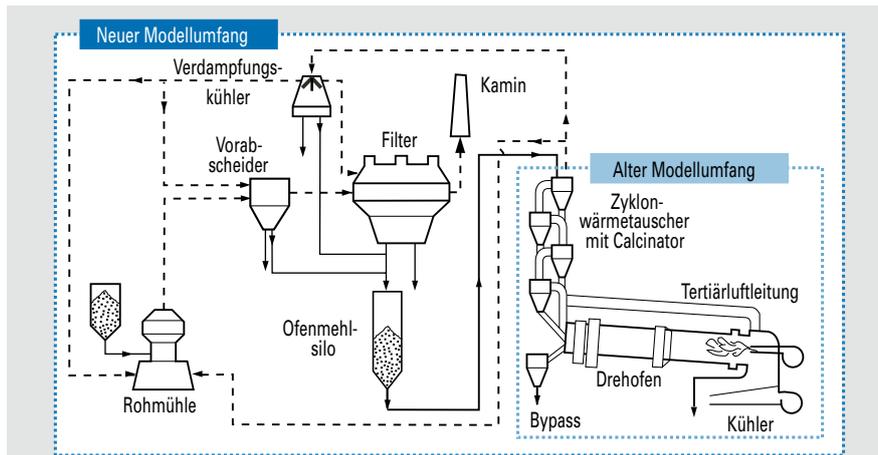


Bild I-7: Erweiterung des verfahrenstechnischen Modells um die Berechnungsmodule für die Anlagenteile des äußeren Kreislaufs

erlauben es, den stationären Zustand für die gesamte Klinkerproduktionsanlage zu bestimmen. Aufgrund des modularen Aufbaus können somit unterschiedliche Anlagen individuell und flexibel hinsichtlich der Parameter der einzelnen Anlagenteile, der Anlagenschaltung, der Betriebsweisen und der Rohmaterialien und Brennstoffe abgebildet werden. Bei der Nutzung des Modells stehen energetische und stoffliche Fragestellungen im Vordergrund, wobei die Wechselwirkungen innerhalb des Prozesses von besonderem Interesse sind.

Neben den erwähnten Studien zum Einsatz von Sekundärbrennstoffen und der Entlastung von Chlorkreisläufen über einen Gasabzug können mit relativ geringem Aufwand preiswerte und risikolose Parametervariationen durchgeführt werden. Somit können Aussagen zu den Auswirkungen von Anlagenumbauten, zum Beispiel zusätzliche oder effektivere Zyclone im Wärmetauscher, sowie einer geänderten Betriebsführung, wie beispielsweise einer Absenkung der Sinterzonen-temperatur, gemacht werden.

Ausgangsbasis ist bei allen Berechnungsstudien der Referenzzustand einer Anlage, der in Zusammenarbeit mit dem Anlagenbetreiber aufbauend auf Messergebnissen und Betriebserfahrungen entwickelt wird und den jeweils aktuellen Normalbetrieb der Anlage möglichst exakt widerspiegeln soll. Die Berechnungen mit Parametervariationen liefern umfangreiche Daten zu den interessanten Prozessgrößen für alle Anlagenteile. Die qualitative und quantitative Auswertung erfolgt über einen Vergleich mit dem Referenzszenario. Das mathematische Modell basiert auf allgemein anerkannten Grundlagen aus der Verfahrenstechnik, der Wärmeübertragung und der

Werkstoffwissenschaften sowie dem Prozesswissen aus umfangreichen Ofen- und Laborversuchen, die vom FIZ durchgeführt wurden. Die Belastbarkeit der Rechenergebnisse wurde durch Berechnungen für verschiedene Ofenanlagen und den Vergleich der Ergebnisse mit Messwerten mehrfach überprüft und verbessert. Die wichtigsten chemischen Reaktionen sind die Entsäuerung des Kalksteins, die Klinkerphasenbildung sowie die Verfeuerung von Brennstoffen, die für jeden Bereich der Ofenanlage detailliert berechnet werden. Da auch die Aschen der Brennstoffe berücksichtigt werden, lassen sich die Auswirkungen eines Brennstoffwechsels somit sowohl hinsichtlich der Menge und Zusammensetzung des Abgases (O_2 , CO_2 , H_2O , N_2) als auch der Klinkerphasen berechnen.

Von besonderem Interesse ist bei einem Brennstoffwechsel oftmals der damit verbundene geänderte Eintrag von Chlor in die Anlage. Chlor bildet zusammen mit Schwefel und Alkalien Kreisläufe zwischen dem Drehofen und den unteren Stufen des Vorwärmers bzw. dem Calcinator aus. Diese Stoffe und ihre Verbindungen verdampfen im Ofen, werden mit dem Gasstrom in den Vorwärmer getragen und kondensieren dort bei niedrigeren Temperaturen an dem Mehl und Staub sowie ansatzbildend an den Anlagenwänden. Neben der erhöhten Gefahr von Betriebsstörungen durch die Ansatzbildung kommt es durch die Verdampfung und Kondensation zu einem Wärmetransport aus dem Ofen in den Wärmetauscher hinein. Dies führt zu einem erhöhten Energieeintrag über die Hauptfeuerung und begrenzt die in der Ofeneinlauf- oder Calcinatorfeuerung einsetzbare Brennstoffmenge. Das Modell wurde deshalb um die Elemente

Schwefel (in Form des wenig flüchtigen Sulfats und des flüchtigen Sulfids), Chlor und Alkalien in Form der kreislaufbildenden chemischen Verbindungen K_2O , Na_2O , KCl , $NaCl$, K_2SO_4 , Na_2SO_4 , $CaSO_4$ und $CaCl_2$ erweitert. Diese Verbindungen werden entweder in dieser Form bereits mit den Rohstoffen und Brennstoffaschen in den Prozess eingetragen, oder sie können sich im Prozess bilden. Sowohl der Eintrag als auch die Bildung wurden ins Modell eingepflegt, wobei die Bildungsprozesse nur bei der Praxis entsprechend vorliegenden Randbedingungen wie geeigneten Temperaturen, der ausreichenden Verfügbarkeit der Reaktionspartner und der Unterschreitung von Sättigungspartialdrücken in der Gasphase gerechnet werden. Neben der Bildung von Verbindungen ist auch die Dissoziation von Verbindungen in die Einzelkomponenten berücksichtigt, sofern ausreichend hohe Temperaturen vorliegen. Somit stehen diese Komponenten innerhalb der Gasphase wieder für die Bildung neuer Alkalichlorid- oder Alkalisulfat-Verbindungen zur Verfügung. Weiterhin können die chemischen Verbindungen verdampfen und kondensieren. Dabei wird die Verdampfung durch das Erreichen des Sättigungspartialdrucks im Gas begrenzt. Für alle chemischen Verbindungen werden Temperaturfenster definiert, innerhalb derer diese Reaktionen ablaufen können. Somit werden die unterschiedlichen Flüchtigkeiten der Verbindungen berücksichtigt. Der berechnete Reaktionsumsatz führt je nachdem, ob die Reaktion exotherm oder endotherm ist, zu einer Anhebung oder Absenkung der örtlichen Gas- oder Materialtemperatur.

In einer Praxis-Anwendung konnten erstmals mit Hilfe des Simulationsprogramms die Auswirkungen veränderter Einträge von Chlor, Schwefel und Alkalien auf die Prozesstemperaturen und z.B. die Anreicherungen von Cl , SO_3 , K_2O und Na_2O im Heißmehl erfolgreich abgeschätzt werden (Bild I-8). Ebenso konnte der kreislaufreduzierende Effekt eines Bypassgasabzugs quantitativ bestimmt werden. Als Kriterium für die notwendige Bypassrate (Bild I-9), also die auf den Ofeneinlaufvolumenstrom bezogene, über den Bypass abgezogene Gasmenge, wurde ein maximaler Chloridgehalt im Ofeneinlaufmehl definiert. Die thermisch relevanten Chlor-, Schwefel- und Alkalikreisläufe können demnach gut abgebildet werden.

Derzeit wird das Modell um das Verhalten der Spurenelemente erweitert, um zukünftig auch genauere Emissionsprognosen für Spurenelemente zum Beispiel im Rahmen

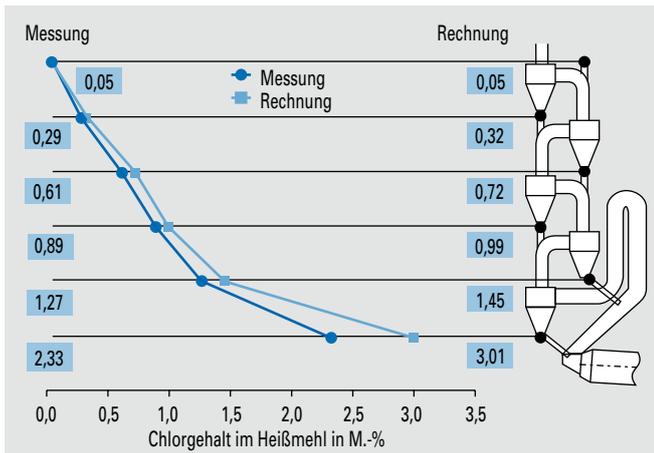


Bild I-8: Vergleich zwischen Berechnungsergebnissen und Messwerten zu Gas- und Mehltemperaturen sowie Heißmehlgehalten

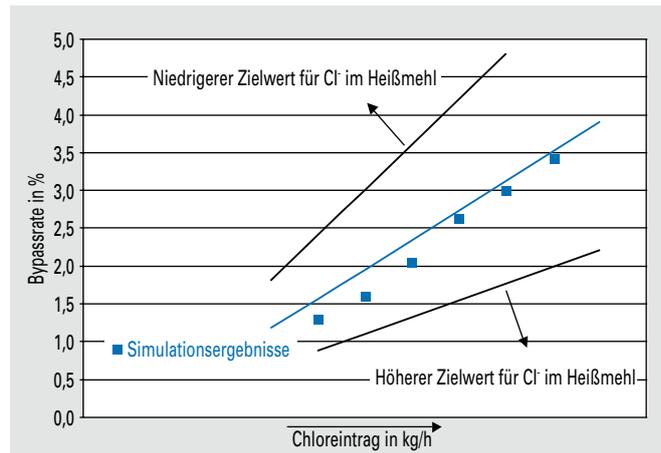


Bild I-9: Notwendige Bypassraten zur Kreislaufentlastung bei steigendem Chlor-Eintrag

von Umweltverträglichkeitsprüfungen erstellen zu können. Das Verhalten der Spurenelemente im Klinkerbrennprozess wird durch die Flüchtigkeit ihrer gebildeten Verbindungen sowie der Einbinde- und Abscheidegrade in den verschiedenen Anlagenteilen bestimmt. Die relevanten Prozessparameter sind neben den Gas- und Materialtemperaturen insbesondere auch die Staubabscheidegrade der Zyklonstufen, das Angebot an kondensationsfördernden, oberflächenreichen Feinfraktionen im Mehl und im Staub sowie die Ausprägung der bereits von dem Programm gerechneten Chlor-, Schwefel- und Alkalikreisläufe. Zur Ermittlung der für die Modellierung notwendigen Daten fanden im Rahmen des AiF-Forschungsvorhabens Nr. 13230N, dessen Schlussbericht im FIZ eingesehen werden kann, Betriebsuntersuchungen an 3 Ofenanlagen statt. Die Modellierung wird methodisch an die Abbildung des Verhaltens von Chlor, Schwefel und Alkalien angelehnt sein und die Spurenelemente im ersten Schritt in elementarer Form berücksichtigt.

Staubkreisläufe im Wärmetauscher

Untersuchungen zur Bestimmung der Staubgehalte in den Zyklonsteigrohren von Wärmetauschern sind unter anderem die Grundlage für die Bestimmung von Transferkoeffizienten verschiedener Verbindungen – wie z.B. von Spurenelementen – für die Zykclone und den Zyklonwärmetauscher insgesamt. Bei Kenntnis der Staubgehalte ist die Berechnung der Staub- und Mehlmassenströme sowie der Staubabscheidegrade der Zykclone möglich. Weiterhin fließen sie in das am FIZ entwickelte verfahrenstechnische Simulationsmodell ein, mit dem der gesamte Klinkerbrenn-

prozess vom Eintrag der Rohmaterialien und der Brennstoffe bis zum Austritt des Klinkers aus dem Kühler und des Ofenabgases aus dem Kamin beschrieben wird. Sowohl die Transferkoeffizienten als auch das Simulationsmodell ermöglichen eine Stoffflussbetrachtung des Zementklinkerbrennprozesses, wie sie zum Beispiel von Behörden zur Bewertung des Einsatzes von Sekundärbrennstoffen herangezogen werden kann. Die Messergebnisse zeigen den bekannten Effekt, dass die Staubabscheidegrade der Zykclone von der obersten zur untersten Stufe hin niedriger werden. Bedingt durch die verringerte Abscheidung erhöhen sich zwangsläufig die Staubkreisläufe und somit die Massenströme, welche die Zykclone durchlaufen.

Im Zyklonvorwärmer einer Drehofenanlage wird zum einen das feuchte Rohmehl getrocknet; zum anderen laufen hier bereits chemische, physikalische und mineralogische Reaktionen wie zum Beispiel die teilweise Calcination des Mehls ab. Das frische Ofenmehl wird unterhalb des obersten Zyklons in die Gassteigleitung dosiert und mit dem Gasstrom in den Zyklon transportiert. Durch die intensive Durchmischung von heißem Gas und Feststoff liegen sehr gute Bedingungen für die Wärmeübertragung vor. Somit kommt es zu einem nahezu vollständigen Temperaturengleich zwischen Gas und Mehl. Dabei kühlt sich das Gas ab und das Material erwärmt sich. Die dem Gas entzogene Wärmeenergie wird somit effizient für die im Feststoff ablaufenden Reaktionen genutzt. Diese sind einerseits die endothermen, das heißt auf Energiezufuhr angewiesenen, Reaktionen, wie zum Beispiel die Verdampfung des Oberflächenwassers und die Austrei-

bung des CO_2 aus dem CaCO_3 und dem MgCO_3 . Andererseits wird die thermische Energie jedoch auch zur Aktivierung der dann exotherm ablaufenden, also mit Energiefreisetzung verbundenen, Reaktionen wie der Umsetzung des organischen Kohlenstoffs zu CO und CO_2 benötigt.

Neben der Funktion der Durchmischung von Gas und Mehl zur effizienten Wärmeübertragung haben die Zykclone die Aufgabe, diese Stoffe auch möglichst effektiv wieder zu trennen. Das abgekühlte Gas soll den Zyklonabscheider mit nur noch niedriger Staubbelastung nach oben zur nächsten Zyklonstufe und im Fall der obersten Zyklonstufe als Rohgas verlassen. In entgegengesetzter Richtung soll idealerweise der gesamte Feststoff aus dem Zyklon austreten, um dann erneut in die Gassteigleitung zu dem nun nächsttieferen Zyklon zu gelangen und dort in das heißere Gas dispergiert zu werden. Eine Abscheideeffizienz von 100 %, das heißt eine vollständige Trennung von Gas und Feststoff, wird jedoch in keiner Zyklonstufe erreicht. Eine Erhöhung der Zyklonabscheidegrade ist zum einen immer mit einem steigenden Druckverlust und damit einem erhöhten Energiebedarf zum Transport des Gases verbunden. Weiterhin ändern sich mit zunehmender Temperatur, das heißt von der obersten zur untersten Zyklonstufe hin, die physikalischen Eigenschaften des Gases derart, dass eine Trennung der Stoffe erschwert wird. Die hohen Temperaturen in den unteren Zyklonabscheidern machen darüber hinaus hinsichtlich der Abscheidung weniger effiziente, jedoch temperatur- und verschleißresistentere Bauweisen notwendig. So werden beispielsweise die Tauchrohre der unteren Stufen kürzer aus-

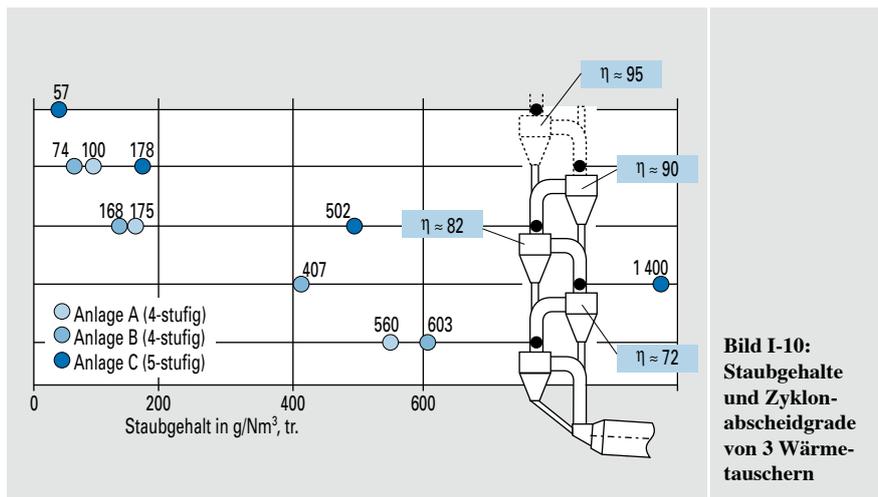


Bild I-10:
Staubgehalte
und Zyklon-
abscheidgrade
von 3 Wärme-
tauschern

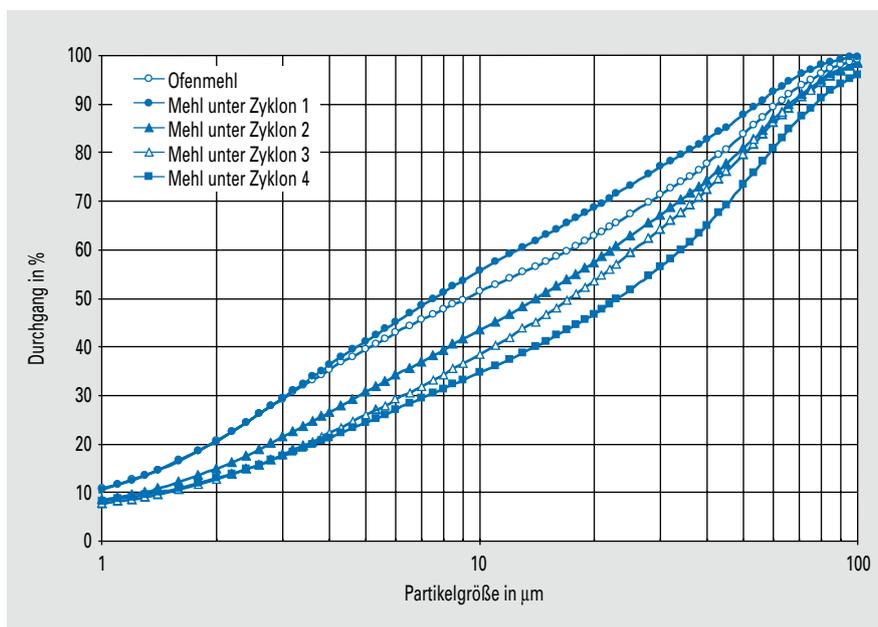


Bild I-11: Korngrößenverteilungen der Heißmehle unterhalb der Zyklonstufen eines Wärmetauschers

geführt, so dass die Trennleistung des Abscheiders herabgesetzt wird.

Die Untersuchungen des Forschungsinstituts zur Bestimmung der Staubgehalte fanden direkt oberhalb der Zyklondeckel und unterhalb der Ofen- bzw. Heißmehlzugabe in den Zyklonsteigrohren statt. Eine direkte Messung der Gasgeschwindigkeiten und damit der Volumenströme konnte aufgrund der hohen Staubbeladungen und der Ansatzneigung der Mehle bei den hohen Temperaturen nicht durchgeführt werden. Vielmehr wurden die Volumenströme über kontinuierliche Messungen der Gaszusammensetzung und Sauerstoffbilanzen berechnet. Die Absaugung der staubbeladenen Teilgasströme erfolgte isokinetisch unter Verwendung einer luftgekühlten Sonde und eines temperaturbeständigen

Filtermaterials aus Quarzfasern. Da die Gasströmungen in den Steigrohren einen noch ausgeprägten, in den Zyklonen erzeugten Drall haben, musste zunächst der geeignete Winkel der Absaugdüse ermittelt werden. In der Regel ergaben sich bei etwa 45° Abweichung gegenüber der Vertikalen die höchsten Staubgehalte, welche in der Hauptströmungsrichtung zu erwarten sind. In Bild I-10 sind die Messergebnisse der Staubgehalte in den Steigrohren der Zyklone von 3 verschiedenen Wärmetauschern dargestellt. Weiterhin sind die für die einzelnen Zyklonstufen ermittelten Staubabscheidgrade angegeben. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass sich ausgeprägte Staubkreisläufe insbesondere in den unteren Zyklonstufen ausbilden. Dies führt dazu, dass der Mehlmassenstrom in die unterste Zyklonstufe um einen Faktor

von bis zu 3 höher sein kann als der Ofenmehlaufgabemassenstrom.

Ergänzend zu den Staubgehaltbestimmungen wurden die Korngrößenverteilungen der Mehl- und Staubproben nach Cilas ermittelt. Es zeigte sich, dass die Mehle beim Durchlaufen des Zyklonvorwärmers vom Ofenmehl hin zum Heißmehl deutlich gröber werden (Bild I-11). Dies liegt einerseits an der Abscheidecharakteristik der Zyklone, nach der die feinen Kornfraktionen als Staub mit dem Gasstrom nach oben abgeführt werden, während die größeren Anteile des Feststoffs nach unten abgeschieden werden. Ob andererseits weitere Effekte, wie zum Beispiel die Bildung von dauerhaften Agglomeraten aus den mit steigender Temperatur klebriger werden Heißmehlpartikeln, eine Rolle spielen, ist bisher ungeklärt.

Modellierung der Verbrennung im Calcinator

Betriebsuntersuchungen des Forschungsinstitutes der Zementindustrie haben gezeigt, dass durch eine optimierte Brennstoff-, Mehl- und Luftzuführung in Calcinatoren eine effektive NO_x -Minderung bei gleichzeitigem vollständigem Ausbrand erzielt werden kann. Die Optimierung der Betriebsweise des Calcinators ist dabei jedoch häufig mit einem kostenintensiven Umbau – z. B. für die Umlegung von Brennstoff- oder Mehlleitungen – verbunden. Zur Vermeidung unnötiger Umbaukosten hat es sich in der Kraftwerkstechnik als geeignet herausgestellt, die Vorgänge im Brennprozess zunächst zu simulieren, und anschließend das meistversprechende Konzept umzusetzen. Der VDZ-Arbeitskreis „Betriebsverhalten von Vorcalcinieranlagen“ hat deshalb angeregt, die Vorgänge im Calcinator ebenfalls mathematisch abzubilden, um der Zementindustrie ein Instrument in die Hand zu geben, zukünftig verschiedene kostspielige Umbaumaßnahmen im Vorfeld besser abwägen zu können.

Vor diesem Hintergrund führt das Forschungsinstitut der Zementindustrie nunmehr in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Energieanlagen- und Energieprozesstechnik (LEAT) der Ruhr-Universität Bochum und dem Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik (LUAT) der Universität Essen/Duisburg ein von der AiF gefördertes Simulationsprojekt – aufbauend auf den Ergebnissen einer Machbarkeitsstudie – durch. Ziel dieses Projekts ist, die betriebstechnische Optimierung von Vorcalcinieranlagen hinsichtlich Schadstoffbildung, NO_x -Reduktionsmaßnahmen und Ansatzbildung durch

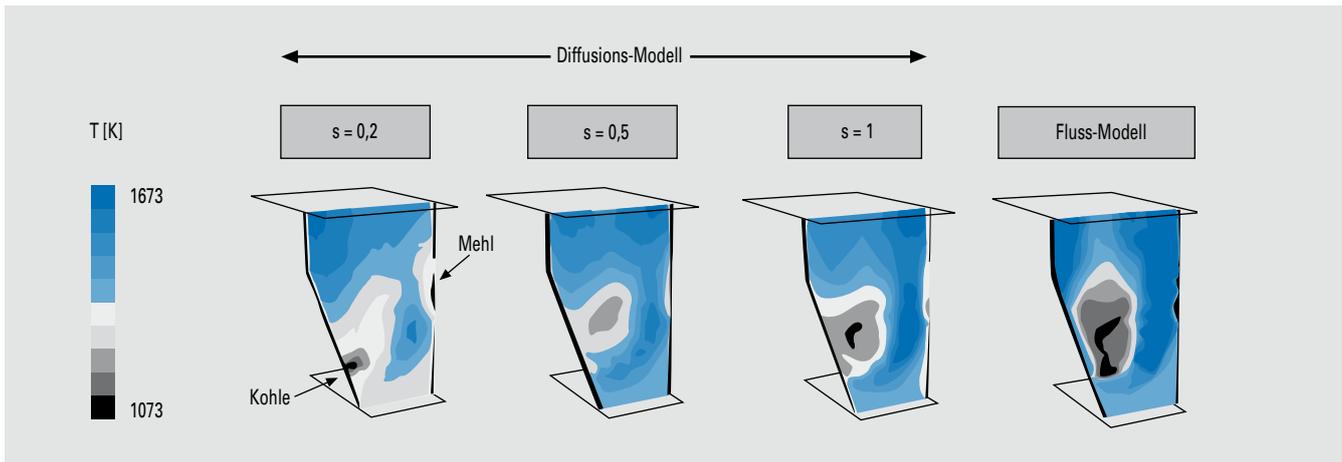


Bild I-12: Parameterstudie des Streuungskoeffizienten s beim Diffusionsmodell

numerische Simulation zu unterstützen. Die Möglichkeit einer weitgehend abgesicherten Simulation der Vorgänge im Vorcalcinator vereinfacht die gezielte betriebliche Optimierung und kann somit den Aufwand für zeit- und kostenintensive Versuche an laufenden Ofenanlagen verringern. Darüber hinaus lassen sich fundierte Aussagen über die technische Realisierbarkeit gestufter Calcinatorfeuerungen zur Schadstoffminderung an vorhandenen Anlagen leichter treffen. Weitere Einsatzgebiete der numerischen Simulation sind in diesem Zusammenhang die Untersuchung von Schadensfällen und Konzeptstudien zur Auslegung, zur energetischen Optimierung und zur flexiblen Verwendung von Sekundärbrennstoffen.

Bei der Simulation müssen Vorgänge wie die lokale Interaktion zwischen Turbulenz und chemischer Reaktion, zwischen Zündungs- und Verlöschungseinflüssen, zwischen den beiden Phasen bei hohen Beladungen sowie die turbulenten Wechselwirkungen innerhalb der Partikelphase mathematisch beschrieben werden. Zur Lösung ähnlicher Fragestellungen wurden Lösungsansätze für die Anwendung in der Kraftwerkstechnik entwickelt. In einer vom FIZ finanzierten Machbarkeitsstudie wurde deren Anwendung unter den in Vorcalcinatoren herrschenden Bedingungen überprüft. Im Rahmen dieser Studie wurden geeignete Parameter für ein modifiziertes Turbulenzmodell sowie ein Strahlungs-Diffusionsmodell ermittelt. Mit Hilfe dieses vereinfachten Modells konnten erste, viel versprechende Ergebnisse hinsichtlich der Strömungsverhältnisse im Calcinator erreicht werden. Die realen Bedingungen im Calcinator konnten mit diesem vereinfachten Modell jedoch nur näherungsweise beschrieben werden. Zur Verfeinerung des Modells hinsichtlich der Strömungsverhältnisse

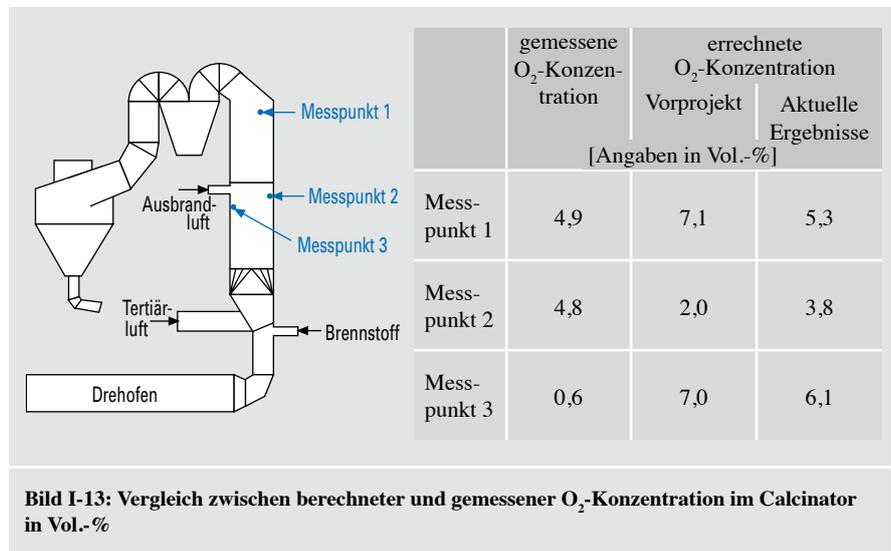


Bild I-13: Vergleich zwischen berechneter und gemessener O₂-Konzentration im Calcinator in Vol.-%

nisse und der Schadstoffbildung werden nunmehr weitergehende Untersuchungen und Anpassungen im Rahmen des oben genannten Forschungsvorhabens durchgeführt. Das Modell wird dabei fortlaufend durch Messdaten des Forschungsinstituts der Zementindustrie validiert.

Am LUAT wird das Ziel verfolgt, den Einfluss der hohen Partikelbeladung auf die Turbulenz- und Strahlungseigenschaften detaillierter als bisher zu untersuchen. Erste Ergebnisse zeigen, dass ein modifiziertes Diffusionsmodell die Strahlungsvorgänge in einem Calcinator bei hoher Feststoffbeladung am genauesten wiedergibt. **Bild I-12** zeigt die Temperaturverteilung im unteren Teil des Calcinator, in dem Brennstoff und Mehl aufgegeben werden. Die Streuung der Strahlung an den Partikeln, gekennzeichnet durch den Streuungskoeffizienten s , hat einen maßgeblichen Einfluss auf das Temperaturprofil. Im Bereich zwischen 0,2 und 0,5 für den Streuungskoeffizienten werden demnach die besten Ergebnisse erreicht.

Am LEAT konzentrieren sich die Arbeiten auf ein universell einsetzbares und hinreichend genaues Calcinerungs- und Sulfatisierungsmodell sowie den Einfluss der Entsäuerungsreaktion auf die Konzentrationen- und Temperaturverteilung und damit die Schadstoffbildung / Schadstoffreduktion. Diese Arbeiten werden ergänzt sowohl durch experimentelle Grundlagenuntersuchungen zur Schadstoffbildung im Calcinator als auch durch numerische Simulationen der Mischung, Brennstoffumsetzung und Wärmeübertragung im Zementdrehrohrföfen und Calcinator.

Bei den bisher durchgeführten Arbeiten wurde der enorme Einfluss der hohen Partikelbeladung hinsichtlich Turbulenz und Strahlung auf die Schadstoffbildung und Entsäuerungsreaktion ersichtlich, so dass der Einsatz von speziellen Modellvorstellungen notwendig ist. Zur genaueren Beschreibung der Reaktionsvorgänge in einem Calcinator wurden die bestehenden Modellansätze in vielen Details bereits ver-



Bild I-14: Herausgefallenes Segment einer Zyklondecke

feinert und angepasst. Hierbei hat sich gezeigt, dass das Modell zum Schadstoffbildungsmechanismus sowie das Modell des Calcinerungsprozesses den realen Bedingungen weiter angepasst werden konnten. In **Bild I-13** ist der Vergleich zwischen berechneter und gemessener Sauerstoffkonzentration dargestellt. Dabei sind sowohl die Ergebnisse aus den Berechnungen der Vorstudie als auch die aktuellen Simulationsergebnisse den Messergebnissen gegenübergestellt. Aus den Werten ist ersichtlich, dass das Modell zur Berechnung der Gaszusammensetzung gegenüber dem früheren Modell verbessert wurde. Die während der Messung festgestellten sauerstoffreichen und sauerstoffarmen Bereiche können mit Hilfe des Simulationsmodells hinreichend genau ermittelt werden. Es wird aber auch deutlich, dass insbesondere im Bereich der Zugabe der Ausbrandluft (Messpunkt 3) die Messergebnisse noch nicht mit der gewünschten Genauigkeit wiedergegeben werden können.

Die von LEAT und LUAT vorgenannten Teilmodelle werden daher derzeit weiterentwickelt und den tatsächlichen Randbedingungen weiter angepasst. Die Teilmodelle werden dazu kontinuierlich anhand vom FIZ zur Verfügung gestellter Mess- und Betriebsdaten angepasst und überprüft. Anschließend sollen die beiden Teilmodelle zu einem Gesamtmodell kombiniert werden. Neben der Variation verschiedener Stufungskonzepte (Mehl-, Brennstoff-, Luftstufung) soll mit diesem Modell auch der Einfluss unterschiedlicher Kohlen als Brennstoff untersucht werden. Dabei sollen die Vorgänge in unterschiedlichen Calcinatoren simuliert und mit tatsächlichen Werten verglichen werden. Diese Untersuchungen finden weiterhin in enger Abstimmung mit dem Forschungsinstitut der Zementindustrie statt.

Feuerfeste Materialien

Im Berichtszeitraum hat der Ausschuss „Umwelt und Verfahrenstechnik“ einen Arbeitskreis „Feuerfeste Materialien“ eingerichtet, um den aktuellen Kenntnisstand zu diesem Thema zusammenzustellen und beschreiben zu lassen. Der Arbeitskreis ging aus dem Arbeitskreis „Betriebsverhalten von Vorcalcineranlagen“ hervor, der bereits eine gute Vorarbeit geleistet hat. Folgende Themen werden von dem neuen Arbeitskreis bearbeitet:

- Techniken der Zustandsdiagnose
- Auswahl feuerfester Materialien und Anker an verschiedenen Einsatzorten in der Ofenanlage
- Einfluss der Einsatzbedingungen auf den Verbrauch feuerfester Materialien und Korrosionsschäden (Einsatz von Sekundärbrennstoffen, Laufringbefestigung, verbesserte Rekuperation im Klinkerkühler, Hot-Spot-Fahrweise im Calcinator etc.)
- Konstruktion des Feuerfestaufbaus in verschiedenen Anlagenteilen
- Moderne Ausbruchtechniken
- Heißreparaturen
- Moderne Einbautechniken
- Arbeitssicherheit bei Feuerfestarbeiten
- Eingangskontrolle der feuerfesten Steine
- Trocknungs- und Aufheizprozeduren
- Kennzahlen des Feuerfestverbrauchs
- Entsorgung von verbrauchtem Feuerfestmaterial.

Zu Beginn der Arbeit wurden Formblätter für die verschiedenen Anlagenteile bzw. Ofenzonen entwickelt, um den Feuerfestaufbau, die eingesetzten Materialien, die Einsatzbedingungen und die vorliegenden Erfahrungen zusammenzutragen. Außerdem wurden Arbeitsgruppen gebildet, die die verschiedenen Themen bearbeiten.

Zur Bestimmung der Restfutterstärke werden sowohl zerstörungsfreie Verfahren als auch Bohrungen durchgeführt. Vorschädigungen (z. B. Korrosionserscheinungen) können in der Regel nur durch Kernbohrungen oder das Ausbrechen von Fenstern erkannt werden. Bei der Qualitätsauswahl der Feuerfestmaterialien in den verschiedenen Ofenzonen müssen die Einsatzbedingungen, das Ansatzverhalten des Brennguts, die Höhe der Stoffkreisläufe und die geplante Einsatzdauer berücksichtigt werden. Der Ofeneinlaufbereich wird in der Regel mit Spinell- oder Schamottesteinen mit einem Al_2O_3 -Gehalt $> 40\%$ zugestellt. In der Übergangszone kommen Spinell- oder Magnesitsteine, in der Sinterzone Herzenit-, Magnesit-, Spinell- oder Dolomitsteine und im Ofenauslaufbereich Hochtonerde bzw. Spinell-Steine zum Einsatz. Der Einlaufkonus und Ofenauslauf werden zum Teil auch mit Gießmassen zugestellt. Die Konstruktion des Drehofens hat Auswirkungen auf den Feuerfestverschleiß. Drehöfen, die nur auf 2 Laufringstationen gelagert sind, weisen aufgrund der geringeren mechanischen Beanspruchung in der Regel einen geringeren Feuerfestverbrauch auf als Drehöfen mit 3 oder mehr Laufringstationen. Wichtig für die mechanische Beanspruchung des Feuerfestmaterials und somit für den Feuerfestverschleiß ist auch die Befestigung der Laufringe. Verzahnte Laufringe weisen hier offenbar Vorteile gegenüber losen Laufringen auf.

Bei der Konstruktion des Feuerfestaufbaus außerhalb des Drehofens werden je nach Anlagenteil und Anlagenbetreiber unterschiedliche Lösungen gewählt. Der Feuerfestaufbau besteht in der Regel aus einem Arbeitsfutter und einer Dämmschicht, die in 1 oder 2 Schichten aufgebaut ist. Zylindrische Teile und Gewölbedecken werden in der Regel gemauert, während ebene Flächen sowohl mit Steinen oder Fertigteilen als auch mit Spritz- oder Gießmassen mit unterschiedlichen Feldgrößen zugestellt werden. Das Vorsehen von Dehnfugen und die Fugenpflege ist bei vielen Anlagenteilen für die Haltbarkeit des Feuerfestmaterials wichtig.

Zu den am stärksten beanspruchten Bauteilen außerhalb des Drehofens zählen die Decken der unteren Zyklone (**Bild I-14**). Insbesondere die Verankerungssysteme unterliegen starken Korrosionserscheinungen. Deshalb werden häufig Mischverankerungen aus keramischen Ankern und Stahlankern gewählt. Zur Bemusterung des Zustands der Zyklondecken und des Verankerungssystems sollten in den Zyklondecken entsprechende Inspektionsöffnungen

vorgesehen werden. Vor dem Ausführen von Feuerfstarbeiten im Wärmetauscher muss der Zustand der Zyklondecken von außen begutachtet werden. Beim Abbruch von Zyklondecken ist darauf zu achten, dass grundsätzlich von oben durch die Kontrollöffnungen abgestemmt wird. Erst nach der Inspektion der Zyklondecke durch die Kontrollöffnungen kann das Feuerfestmaterial des Zyklons von innen mittels fahrbarer Rüstungen bemustert werden, und nach Freigabe können die Gerüste und Arbeitsbühnen eingebaut werden. Um Gefährdungen bei gleichzeitigen Arbeiten an unterschiedlichen Stellen zu vermeiden, sollten die Zyklone einzeln durch Nadel-schieber abgeschottet werden.

Erfahrungen mit der Vergasung von Sekundärbrennstoffen

Die Wahl eines Brennstoffs beim Einsatz im Klinkerbrennprozess hängt zunächst von seiner Verfügbarkeit, den Kosten, der Lagerfähigkeit, der Dosierfähigkeit, den sicherheitstechnischen Anforderungen und den enthaltenen Störstoffen ab. Darüber hinaus sind auch physikalische und chemische Kenngrößen der Brennstoffe von Bedeutung. Flugfähigkeit, Feuchtegehalt, Korngröße, Heizwert, Homogenität, Gehalt an Chlor, Schwefel, Alkalien und Phosphat, Reaktivität, Brennstoff-Stickstoff-Gehalt und Schwermetallgehalte haben Auswirkungen auf die Verfahrenstechnik bzw. auf die Emissionen.

Sekundärbrennstoffe werden in der Regel dem Brennprozess direkt aufgegeben. Hierfür eignen sich grundsätzlich alle diejenigen Brennstellen, an denen auch Regelbrennstoffe aufgegeben werden. Je nach Art des einzusetzenden Brennstoffs ist die Brennstoffdosierung entsprechend aufwendig. Daher kann es im Einzelfall sinnvoll sein, die Sekundärbrennstoffe über eine separate Anlage zunächst thermisch vorzubehandeln. Da in den letzten Jahren mehrere Drehofenanlagen in der Zementindustrie mit solchen Anlagen ausgestattet wurden, hat sich der VDZ-Arbeitskreis „Betriebsverhalten von Vorcalcineranlagen“ mit diesen Technologien beschäftigt.

Grundsätzlich muss zwischen 2 Anlagentypen unterschieden werden. Bei Vergasern wird der Brennstoff unter unterstöchiometrischen Bedingungen pyrolysiert und das entstandene Schwachgas anschließend dem Calcinator als Brennstoff aufgegeben. Die dabei benötigte Energie wird entweder von außen zugeführt oder bei einer Teilverbrennung freigesetzt. In Vorbrennkammern hingegen wird der Brennstoff bei überstöchiometrischen bzw. leicht unter-

Tafel I-4: Kriterien für die Auswahl von Anlagen zur Vorvergasung / Vorverbrennung

Wirtschaftliche Kriterien	Einbindung in den Prozess	Eigenschaften der Sekundärbrennstoffe	Sonstige Kriterien
Aufbereitungskosten für SBS	Gleichmäßigkeit des Energieeintrags	Feinheit der Aufbereitung	Energetischer Wirkungsgrad
Investitionskosten / Betriebskosten	Nutzung vorgewärmter Tertiärluft	Homogenität	Sicherheitskonzept
Abtrennung von Wertstoffen	Auswirkung auf die Emissionen	Mindestheizwert	Reparatur im laufenden Betrieb
Verfügbarkeit	Ausschleusung von kreislaufbildenden Stoffen	Flexibilität hinsichtlich Brennstoffwechsel	
Einsatzmöglichkeit des Schwachgases am Hauptbrenner	Abtrennung unerwünschter Anteile	Rohstofflich verwertbare Anteile / Korrektur bei Ausfall	
Einsatz des Schwachgases an mehreren Ofenanlagen (Verbundlösung)	Rohstofflich verwertbare Anteile / Korrektur bei Ausfall	Sensibilität der Anlage gegenüber kreislaufbildenden Stoffen	
Obergrenze für Substitution von Regelbrennstoffen	Auswirkung auf den Anlagenbetrieb / Möglichkeit zur Entkoppelung		
	Regelung der Anlage		
	Auswirkung auf die Produktqualität		

stöchiometrischen Bedingungen zu einem deutlich höheren Anteil umgesetzt und die dabei freigesetzte Energie zur Entsäuerung des Brennguts verwendet. Die noch unverbrannten Anteile des Brennstoffs (Restkoks) können anschließend dem Calcinator aufgegeben werden.

Derzeit existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Technologien für die Vorvergasung / Vorverbrennung von Abfällen. In der Zementindustrie wurden bisher die zirkulierende Wirbelschicht, die Vorbrennkammer und die so genannte Hot Disk an Drehofenanlagen installiert. In Deutschland existieren bisher eine zirkulierende Wirbelschicht und eine Vorbrennkammer, die in erster Linie für den Einsatz von Ganzreifen ausgelegt wurde. Die vorliegenden Betriebserfahrungen zeigen, dass beide Verfahren zuverlässig arbeiten, der verfahrenstechnische Aufwand jedoch nicht zu unterschätzen ist. Die zirkulierende Wirbelschicht eignet sich ausschließlich für den Einsatz von relativ feinkörnigen Brennstoffen, während die Vorbrennkammer eher für grobstückige Brennstoffe ausgelegt ist. Beide Anlagen können mit Hilfe von Schiebern von der Ofenanlage entkoppelt werden, so dass ein Ofenbetrieb unter ausschließlichem Einsatz von Primärbrennstoffen weiterhin möglich ist. Bei der Wahl der geeigneten Anlage spielen insbesondere die Investitions- und Be-

triebskosten, die Brennstoff-Aufbereitungskosten, die Verfügbarkeit, Ausschleusung von Störstoffen und kreislaufbildenden Stoffen, potentiell erforderliche Sicherheitskonzepte und Obergrenzen für den möglichen Einsatz des Schwachgases / Restkokes in Calcinator und Hauptfeuerung eine Rolle.

Je eher sich ein Anlagenkonzept für ein sehr breites Spektrum an Sekundärbrennstoffen eignet, desto mehr Flexibilität bietet es dem Betreiber im Hinblick auf die Sekundärbrennstoffauswahl. Die Möglichkeit, häufige Brennstoffwechsel vorzunehmen, ist in dieser Hinsicht ebenfalls vorteilhaft. Weitere Kriterien für die Auswahl eines geeigneten Verfahrens sind die Anforderungen an Feinheit, Homogenität und Heizwert der Sekundärbrennstoffe und an deren Gehalt an kreislaufbildenden Stoffen.

Das Anlagenkonzept und die Abfallart bestimmen weitgehend den Heizwert des Schwachgases (3 600 bis 36 000 kJ/m³). Gase mit niedrigem Heizwert können im Calcinator eingesetzt werden. Die Zugabe in der Hauptfeuerung ist derzeit noch mit technischen Problemen verbunden und wird nicht praktiziert. Die Auswirkungen des Verfahrens auf den Gesamt-Brennstoffenergieverbrauch sind einerseits vom energetischen Wirkungsgrad des Gesamt-

systems, andererseits von möglichen Auswirkungen auf die Rohgasmenge und die Rekuperation des Klinkerkühlers abhängig. Für die Gleichmäßigkeit des Ofenbetriebs ist ein gleichmäßiger Energieeintrag durch das System zur Vorvergasung / Vorverbrennung von Bedeutung. Darüber hinaus sollten das Sicherungskonzept der Anlage sowie mögliche Auswirkungen auf die Klinkerqualität und die Emissionen sorgfältig geprüft werden. **Tafel I-4** fasst einige Auswahlkriterien zusammen, die vom VDZ-Arbeitskreis „Betriebsverhalten von Vorcalcineranlagen“ erarbeitet wurden.

Dosierung von Fe(II)SO_4 zum Sackzement

Mit der Branchenregelung „Chromatarme Zemente und Zubereitungen“ wurde im Jahr 1999 von den Bau-Berufsgenossenschaften, den Arbeitsschutzbehörden, den Zementanwendern, dem Baustofffachhandel sowie der Zementindustrie ein Bündel von Maßnahmen mit dem Ziel verabschiedet, den Arbeitsschutz beim händischen Umgang mit zementhaltigen Produkten zu verbessern. Ein Element dieser Vereinbarung ist seit Beginn des Jahres 2000 die ausschließliche Herstellung der bereits seit 1997 flächendeckend angebotenen „chromatarmen“ Sackzemente. Mit der Branchenregelung verpflichtete sich die deutsche Zementindustrie, den Grenzwert von 2 ppm wasserlöslichem Chromat gemäß der Technischen Regel für Gefahrstoffe 613 (TRGS 613) durch Zusatz geeigneter Reduktionsmittel in allen deutschen Sackzementen sicherzustellen. Mittlerweile hat sich die deutsche Zementindustrie dafür ausgesprochen, auch den losen Zement chromatreduziert herzustellen.

Als Reduktionsmittel werden Fe(II)SO_4 oder aber das wesentlich teurere SnSO_4 eingesetzt. Im Vergleich zum Fe(II)SO_4 zeichnet sich SnSO_4 durch eine höhere Lagerstabilität, eine bessere Löslichkeit und somit eine höhere Reduktionswirkung aus. Dies bedingt, dass bereits deutlich geringere Mengen (ca. Faktor 10 im Vergleich zu Fe(II)SO_4) eine ausreichende Reduzierung sicherstellen können. Hierfür ist allerdings eine noch präzisere Dosier- und Homogenisieretechnik als beim Fe(II)SO_4 vorzusehen.

Die präzise und reproduzierbare Zugabe einer vergleichsweise kleinen Menge des Reduktionsmittels zu einem großen, oszillierenden Massenstrom – dem Zement – erfordert einen erheblichen anlagentechnischen Aufwand. Bei der Projektierung der einzelnen Anlagen, der Inbetriebnahme und der Optimierung im Betrieb ist ei-

ne Vielzahl von Aspekten wie Lagerung, Transport, Dosierung, Entstaubung, Druckentlastung, Verriegelungen etc. bis hin zu unvorhergesehenen Betriebszuständen zu berücksichtigen. Die Erkenntnisse aus diesem Lernprozess wurden in einer VDZ-Arbeitsgruppe mit Vertretern der Mitgliedswerke zusammengefasst. Hierbei hat sich gezeigt, dass es verschiedene verfahrenstechnische Lösungen der Fe(II)SO_4 -Zugabe geben kann, die zu zufrieden stellenden Ergebnissen führen. Erfahrungen mit der Zugabe von SnSO_4 lagen zu diesem Zeitpunkt noch nicht vor.

Sowohl beim Transport als auch beim Umblasen und Lagern des Fe(II)SO_4 ist darauf zu achten, dass Temperaturen oberhalb von 60 °C möglichst vermieden werden. Oberhalb dieser Temperatur kommt es neben dem Aufschmelzen zur allmählichen Abspaltung von Hydratwasser. Dadurch nimmt die Löslichkeit und damit auch die Wirksamkeit des Reduktionsmittels ab. Auch können sich durch das frei werdende Wasser massive Konglomerationen bilden, die die Austragsvorrichtungen und Förderwege blockieren. Insofern kommt es darauf an, das Reduktionsmittel auch vor zusätzlicher Feuchtigkeit von außen zu schützen. Bewährt hat sich in diesem Zusammenhang der Einsatz eines Kältetrockners für die Transport-Druckluft sowie der Schutz des Silos vor direkter Sonneneinstrahlung. Zur weiteren Vermeidung von Agglomerationen schon beim Lagern des Fe(II)SO_4 hat es sich zudem als hilfreich erwiesen, einen möglichst hohen Umlauf im Vorratssilo zu gewährleisten (Lagerung möglichst < 3 Wochen) bzw. die Materialhöhe im Silo nicht zu groß zu wählen (Reduzierung des Eigendruckes).

Da die Integration der Dosiersysteme meist in bereits bestehende Anlagen erfolgt und somit von Teil sehr unterschiedliche Konzepte verfolgt werden, muss den individuellen Besonderheiten Rechnung getragen werden. Prinzipiell hat es sich jedoch als zweckmäßig erwiesen, sowohl den Zement als auch das Fe(II)SO_4 gravimetrisch zu erfassen und beide Stoffströme beispielsweise im Schwingsieb oberhalb des Packvorratsbunkers zu mischen. Anschließend sollte das Gemisch über eine Zellenradschleuse mit Druckausgleich in die Packmaschine dosiert werden. Das Anlagenkonzept sollte dabei so ausgelegt sein, dass bei Störungen im System (z.B. Ausfall eines Stoffstroms) kein Zementsack die Packanlage verlässt. Bereits abgefüllte Säcke müssen verworfen werden. Zur Vermeidung von Fehlern bei der Bedienung der Anlage sollte zudem eine Betriebsanweisung vorliegen, die nicht

nur den Regelbetrieb, sondern auch die Vorgehensweise bei Störungen und bei der Befüllung sowie Entleerung des Packers und des Vorratsbunkers beschreibt.

Bei der eigentlichen Fe(II)SO_4 -Dosierung zum Zement (hier am Beispiel über eine Zellenradschleuse) ist zur Vermeidung von Dosierfehlern auf folgende Punkte besonders zu achten:

- Bestimmung beider Materialströme (Zement und Fe(II)SO_4) vor der Mischung, um eine genaue Dosierung zu ermöglichen
- Vorlage des Fe(II)SO_4 in der Zellenradschleuse vor Zugabe des Zements (bessere Vermischung – „Kaffee-auf-Milch-Effekt“)
- Druckausgleich in der Zellenradschleuse zur Vermeidung unkontrollierter Massenströme sowie Anpassung der Entstaubung
- Regelmäßige Wartung der Dosiereinrichtungen und der Zellenradschleuse
- Geeignete Sicherheitsvorkehrungen bei Abweichungen vom Regelbetrieb (Störungen, Anfahren, Abfahren) – Störfallbetrachtungen.

Neben der reinen Handhabung muss im Hinblick auf die Stabilität des Fe(II)SO_4 auch auf die Temperatur des Zements beim Dosieren geachtet werden, um die Wirksamkeit des Reduktionsmittels zu erhalten. Deshalb kann es im Einzelfall zweckmäßig sein, den Zement abzukühlen.

Abgesehen von der Reduktionswirkung des Fe(II)SO_4 übt die Zugabe von Sulfatträgern einen starken Einfluss auf die Verarbeitungseigenschaften von Zementen bis hin zur Festigkeitsentwicklung aus. Auch aus diesem Grund muss das Reduktionsmittel sorgfältig zudosiert werden. Für Chromatreduzierer, die dem frischen Beton als Betonzusatzmittel zugegeben werden, ist beispielsweise die Dosierung als Heptahydrat gemäß Zulassung auf maximal 0,5 M.-% beschränkt, da Zement im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit bereits sulfatoptimiert hergestellt wird. Im Sinne eines für den Anwender sicheren Produkts ist ein ausreichendes Vorhaltemaß jedoch unumgänglich. Ein Wert für dieses Vorhaltemaß ist der so genannte „Überdosierungsfaktor“, der angibt, um wie viel das Reduktionsmittel über den rein stöchiometrischen Bedarf als Funktion des ursprünglichen Chromatgehalts hinaus überdosiert wurde. Mit einem mittleren Überdosierungsfaktor von über 30, also 30facher Dosierung der Menge, die nötig wäre, um den Ausgangschromat-

gehalt auf unter 2 ppm zu reduzieren, ist bei entsprechender Lagerung auch nach längeren Lagerfristen von einem sicheren Produkt auszugehen (siehe **Tafel I-5**).

Korngrößenverteilung bei gemeinsamer Mahlung

Auf die Festigkeit von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen wirken sich vor allem die Reaktivität und Mischungsanteile der Zementbestandteile, aber auch die Korngrößenverteilungen der einzelnen Komponenten aus. Bei der gemeinsamen Mahlung können die Korngrößenverteilungen der Einzelkomponenten nicht unabhängig voneinander beeinflusst werden. Sie werden durch die Mahlbarkeit der Komponenten und die Betriebsweise der Mahlanlage bestimmt. Die schwerer mahlbare Komponente reichert sich in den größeren Fraktionen an, die leichter mahlbare Komponente entsprechend in den feineren.

Im Rahmen eines von der AiF geförderten Forschungsvorhabens wurde untersucht, ob durch die Betriebsweise der Mahlanlage nicht nur die Korngrößenverteilung des gesamten Zements, sondern auch die Feinheiten und Korngrößenverteilungen der Einzelkomponenten beeinflusst werden. Aus der Literatur ist bekannt, dass sich bei hüttensandhaltigen Zementen, die in Walzenschüsselmühlen gemahlen wurden, die Korngrößen der Komponenten Hüttensand und Klinker nicht wesentlich voneinander unterscheiden. Da in Walzenschüsselmühlen hohe interne Materialkreisläufe auftreten, stand insbesondere der Einfluss der Umlaufzahl im Vordergrund des Interesses.

Um den Einfluss der Umlaufzahl auf die Korngrößenverteilungen der Einzelkomponenten zu untersuchen, wurden die Vorgänge in einem Mahlkreislauf bei Mehrkomponentenmahlung zunächst mit einem Computerprogramm simuliert. Die Simulationsrechnungen bestätigten den bekannten Zusammenhang, dass sich mit zunehmender Umlaufzahl das Steigungsmaß der Korngrößenverteilung des Sichterfeinguts erhöht. Bei geringen Umlaufzahlen wies auch die leichter mahlbare Komponente Klinker im gemeinsam gemahlten Gut eine höhere Feinheit als die Hüttensandkomponente auf (**Bild I-15**). Die Feinheitensunterschiede verringern sich jedoch mit zunehmender Umlaufzahl, und die Korngrößenverteilungen der Komponenten Klinker und Hüttensand unterscheiden sich bei hohen Umlaufzahlen nur noch wenig voneinander (**Bild I-16**). Somit kann der beobachtete und oben beschriebene Effekt

Tafel I-5: Reduzierung von Cr(VI) bei deutschen Sackzementen

	Wertebereich	Mittelwert
Cr(VI)-Gehalt vor Zugabe	2 – 18 ppm	9 ppm
Fe(II)SO ₄ -Zusatz ¹⁾	0,1 – 0,6 M.-%	0,32 M.-%
Überdosierung ²⁾ (stöchiometrisch)	Mittlerer Überdosierungsfaktor > 30	
Mittlerer Cr(VI)-Gehalt im Sack	< 0,5 ppm	

¹⁾ Überwiegender Einsatz als Granulat Fe(II)SO₄·n H₂O, mit n = 6-7

²⁾ Faktor = 1 bei stöchiometrischer Dosierung für eine Reduzierung des Cr(VI) auf < 2 ppm

Bild I-15:
Korngrößenverteilung des Sichterfeinguts und der Komponenten Klinker und Hüttensand bei geringer Umlaufzahl

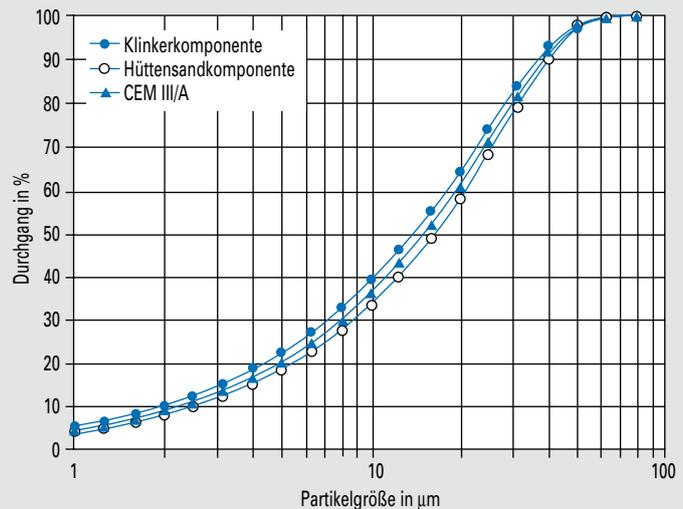
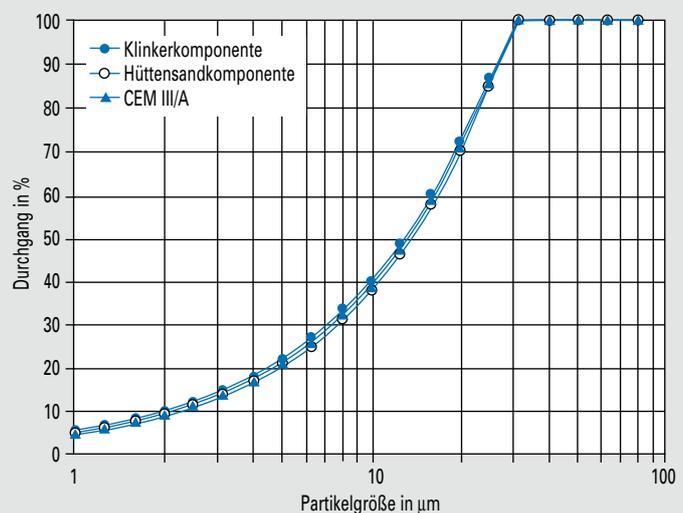


Bild I-16:
Korngrößenverteilung des Sichterfeinguts und der Komponenten Klinker und Hüttensand bei hoher Umlaufzahl



durch die hohe Umlaufzahl in diesen Mühlen erklärt werden.

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen wurden durch Mahlversuche auf der halbertechnischen Mahlanlage der Forschungsinstituts überprüft. Als Mahlgut wurde ein Gemisch aus 50 % Klinker und 50 % Hüttensand verwendet. Zunächst wurde die Mahlanlage im Durchlauf betrieben. Anschließend wurden die Mahlungen im

Umlauf mit dem Sichter durchgeführt, wobei sowohl eine geringe Umlaufzahl von ca. 3 als auch eine hohe Umlaufzahl von ca. 10 eingestellt wurde. Wie erwartet wies das Mahlgut bei der Durchlaufmahlung mit $n = 0,88$ eine relativ breite Korngrößenverteilung auf. Mit zunehmender Umlaufzahl wurde die Korngrößenverteilung des Mahlguts enger und erreichte bei hoher Umlaufzahl ein Steigungsmaß von $n = 1,06$.

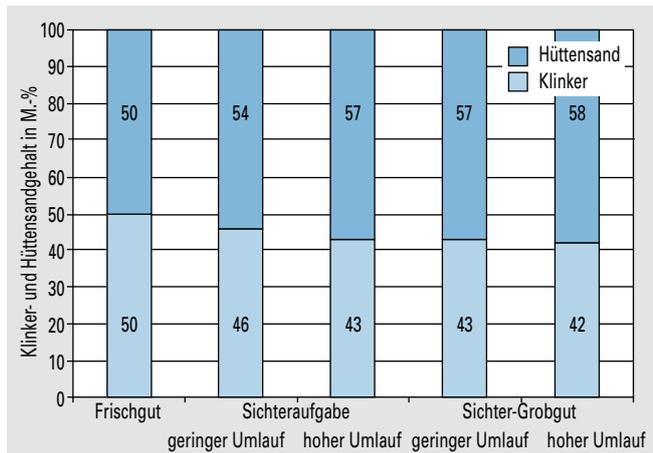


Bild I-17: Klinker- und Hüttensandgehalt des Sichteraufgabeguts und des Sichtergrobguts in Abhängigkeit von der Umlaufzahl

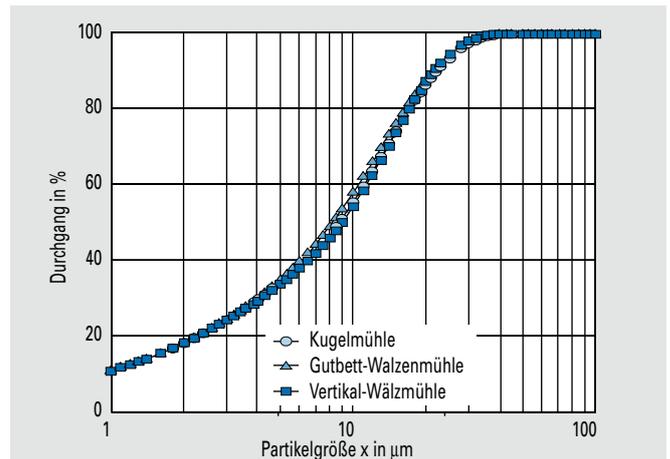


Bild I-18: Korngrößenverteilungen der mit unterschiedlichen Mahlsystemen hergestellten Klinkermehle

Die bei den Mahlversuchen erzeugten Sichteraufgabe-, Sichtergrob- und Sichtergefein- sowie die Ausgangsstoffe Klinker und Hüttensand wurden chemisch analysiert, und mittels Mischungsberechnung wurden die Klinker- und Hüttensandgehalte der Proben bestimmt. Die Ergebnisse sind in **Bild I-17** dargestellt. Wie aus dem Bild ersichtlich ist, reichert sich die schwerer mahlbare Komponente Hüttensand vorrangig im Sichtergrobgut an. Hier wurden bis zu 8 M.-% höhere Hüttensandgehalte als im Frisch- bzw. Fertiggut festgestellt. Aber auch im Sichteraufgabegut wurden höhere Hüttensandgehalte als im Frisch- bzw. Fertiggut gefunden. Durch die Erhöhung der Umlaufzahl von 3 auf 10 verstärkte sich der Hüttensandgehalt im Sichtergrobgut von 57 auf 58 M.-% und im Sichteraufgabegut von 54 auf 57 M.-%.

Um die Korngrößenverteilungen der Einzelkomponenten zu ermitteln, wurden die Sichtergefein- durch Siebung in Fraktionen zerlegt und chemisch analysiert. Durch Mischungsberechnung wurden die Korngrößenverteilungen der Einzelkomponenten bestimmt. Die Ergebnisse der Mahlversuche bestätigen die Ergebnisse der Simulationsrechnungen. Bei dem mit geringer Umlaufzahl hergestellten Zement unterschieden sich die Korngrößenverteilungen der Einzelkomponenten deutlich. Dagegen wurden bei dem mit hoher Umlaufzahl hergestellten Zement nur geringe Feinheitsunterschiede der Einzelkomponenten gefunden.

Einfluss des Mahlsystems auf Zementeigenschaften

Bei der Herstellung von Zementen auf verschiedenen Mahlsystemen entstehen in der Regel unterschiedliche Korngrößenvertei-

lungen. Der Einfluss der Feinheit und der Korngrößenverteilung des Zements auf dessen Eigenschaften wurde in den vergangenen Jahrzehnten ausführlich untersucht (siehe z.B. Tätigkeitsbericht 1996 - 1999). Bei einer Reihe neuerer Untersuchungen verschiedener Autoren wurden aber auch unterschiedliche Eigenschaften von Zementen, die auf verschiedenen Mahlsystemen hergestellt wurden, festgestellt, obwohl die Zemente nahezu gleiche Korngrößenverteilungen aufwiesen. Die beobachteten unterschiedlichen Zement-eigenschaften können entweder auf unterschiedliche Mühlenatmosphären oder auf unterschiedliche Zerkleinerungsmechanismen zurückgeführt werden.

Bei den Zerkleinerungsmechanismen ist hauptsächlich zwischen Druck-, Schlag- und Prallzerkleinerung sowie Abrasion zu unterscheiden. Während Gutbett-Walzenmühlen hauptsächlich durch Druck zerkleinern, herrscht bei Vertikal-Wälzmühlen und Kugelmühlen eine Mischbelastung der Zerkleinerungsmechanismen vor. Im Rahmen eines von der AiF geförderten Forschungsvorhabens wird vom Forschungsinstitut derzeit der Einfluss des Mahlsystems auf Zementeigenschaften bei gleicher Korngrößenverteilung untersucht. Dazu werden verschiedene Klinker und Hüttensande auf unterschiedlichen halbtechnischen Mahlanlagen auf jeweils gleiche Korngrößenverteilung gemahlen und dabei jeweils zwei Feinheitsniveaus von ca. 3000 und ca. 4000 cm²/g eingestellt. Die Mahlungen werden auf einer halbtechnischen Vertikal-Wälzmühle im Technikum der Gebr. Pfeiffer AG, Kaiserslautern, einer halbtechnischen Gutbett-Walzenmühle bei der KHD Humboldt-Wedag AG in Köln und auf einer halbtechnischen Umlaufmahl-

anlage mit Kugelmühle und Sieber im Forschungsinstitut der Zementindustrie durchgeführt.

Bisher liegen die Ergebnisse entsprechender Mahlungen mit 2 Klinkern vor. Es zeigte sich, dass es durch entsprechende Einstellung der Betriebsparameter möglich war, auf den verschiedenen Mahlsystemen Klinkermehle mit nahezu identischen Korngrößenverteilungen herzustellen. In **Bild I-18** sind beispielhaft die erzeugten Korngrößenverteilungen eines Klinkers dargestellt, der auf den vorgenannten Mahlanlagen gemahlen wurde. Die Feinheiten der Klinkermehle betragen 4130 cm²/g für die Vertikal-Wälzmühle, 4160 cm²/g für die Gutbett-Walzenmühle und 4150 cm²/g für die Kugelmühle. Die Klinkermehle wurden anschließend mit Anhydrit- und Halbhydratmehl gemischt und die Zementeigenschaften ermittelt.

Die Wasseransprüche und das Erstarrungsverhalten der so hergestellten Zemente unterschieden sich praktisch nicht. Die Normdruckfestigkeiten sind in **Bild I-19** dargestellt. Der auf der Gutbett-Walzenmühle hergestellte Zement wies gegenüber den mit den anderen Mahlverfahren hergestellten Zementen eine höhere Festigkeit nach 2 Tagen und der auf der Kugelmühle ermahlene Zement eine geringere Festigkeit nach 28 Tagen auf. Die Normdruckfestigkeiten der entsprechenden Klinkermehle mit einem Feinheitsniveau von ca. 3000 cm²/g bestätigten diese Unterschiede nicht. Zwar zeigte der auf der Gutbett-Walzenmühle hergestellte Zement wiederum eine etwas höhere 2-Tage-Festigkeit als die mit anderen Mahlverfahren hergestellten Zemente, gleichzeitig blieb jedoch die 28-Tage-Festigkeit dieses Zements hin-

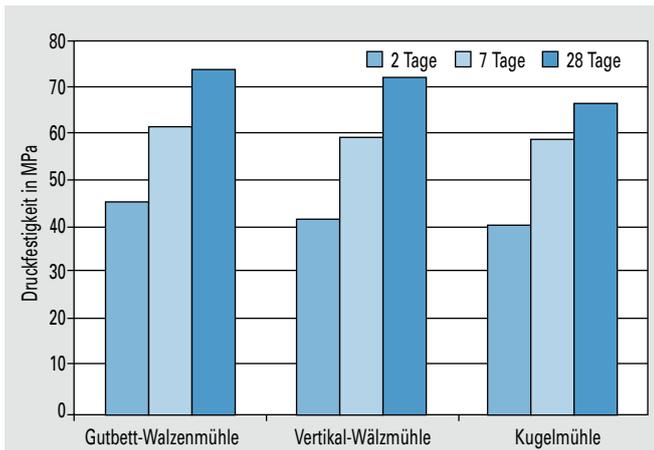


Bild I-19: Druckfestigkeiten von Zementen, die auf unterschiedlichen Mahlsystemen hergestellt wurden

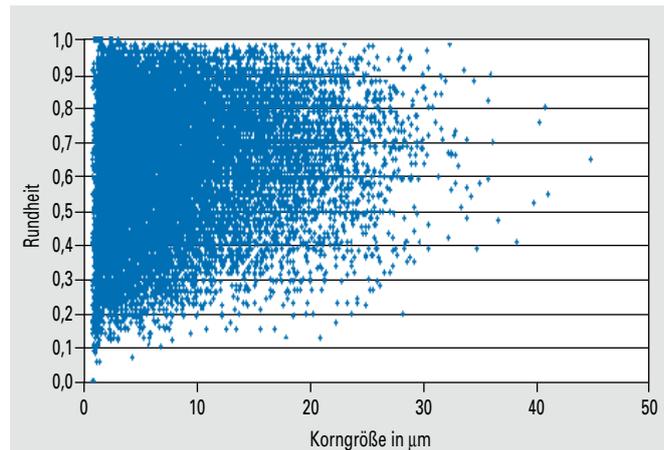


Bild I-20: Rundheitsverteilung eines Klinkermehls

ter denen mit Kugelmühle oder Vertikal-Wälzmühle ermahlene Zementen zurück. Aufgrund der derzeit noch zu geringen Probenanzahl sind diese Ergebnisse noch nicht verallgemeinerbar.

Weiterhin wird im Rahmen des Forschungsvorhabens untersucht, ob sich die auf unterschiedlichen Mahlsystemen hergestellten Klinkermehle bezüglich ihrer Kornform unterscheiden. Hierzu wird ein Analysengerät eingesetzt, bei dem das Klinkermehl mittels Druckluft dispergiert wird und sich auf einem Objektträger niederschlägt. Mit Hilfe einer hochauflösenden Kamera werden die einzelnen Partikel optisch erfasst und mittels einer Bildauswertesoftware vermessen. Insgesamt werden bei jeder

Messung 10 Kornformparameter (z. B. mittlerer Durchmesser, Umfang, Rundheit, Verhältnis von maximaler Länge zu Breite) an 25 000 Einzelpartikeln bestimmt. In **Bild I-20** ist beispielhaft die Rundheit der Partikel eines Klinkermehls über dem mittleren Durchmesser aufgetragen. Der Wert 1 auf der Ordinate bedeutet dabei, dass das Partikel ideal rund ist. Nadelförmige Partikel haben einen Wert nahe 0. Da bis zum Redaktionsschluss nur wenige Messungen vorlagen, kann derzeit noch keine vergleichende Aussage zu Unterschieden in der Kornform abhängig vom Mahlsystem getroffen werden. Weitere chemisch-mineralogische Untersuchungen an den unterschiedlich ermahlene Klinkermehlen sind geplant. Hierbei steht insbesondere

die Frage im Mittelpunkt, ob sich bei unterschiedlichen Zerkleinerungsmechanismen die einzelnen Klinkerphasen in unterschiedlichen Korngrößenbereichen anreichern.

Weitere Mahlungen mit Hüttensand auf den 3 unterschiedlichen halotechnischen Mahlanlagen werden derzeit vorbereitet. Die hergestellten Hüttensandmehle sollen zunächst hinsichtlich der Glasstruktur des Hüttensands untersucht werden, wobei unterschiedliche Verfahren eingesetzt werden sollen. Außerdem werden die Eigenschaften von Mischzementen untersucht, die aus diesen Hüttensandmehlen hergestellt werden.

II

Umweltschutz bei der Zementherstellung

Der hohe Stellenwert, den der Umweltschutz in der Zementindustrie hat, spiegelt sich in zahlreichen Aktivitäten des Forschungsinstitutes wider. So war im Berichtszeitraum eine Vielzahl von neuen Gesetzesvorhaben sowie aktualisierten technischen Regelwerken zu begleiten und aus Sicht der Zementindustrie zu bewerten. Neben den Diskussionen zum neuen europäischen Chemikalien- und Stoffrecht sind hier vor allem die steigenden Anforderungen an die Überwachung von Emissionen zu nennen.

Einen besonderen Schwerpunkt bildete im Berichtszeitraum der CO₂-Emissionsrechtehandel, vor allem im Hinblick auf eine sachgerechte Umsetzung der nationalen Gesetze und des zugehörigen untergesetzlichen Regelwerks. Auch die auf europäischer Ebene verabschiedeten Monitoring-Guidelines mussten aus Sicht der Zementindustrie technisch interpretiert und entsprechend ausgelegt werden.

Von besonderer Bedeutung ist für die Zementindustrie der Einsatz geeigneter Sekundärbrennstoffe. Unmittelbar verbunden mit einem Sekundärbrennstoffeinsatz sind hohe Auflagen an die Überwachung der Emissionen, z. B. von Quecksilber. Zahlreiche Klinkerdrehöfen sind inzwischen mit Analysatoren zur kontinuierlichen Quecksilberemissionsmessung ausgestattet, deren Einsetzbarkeit allerdings in jedem Einzelfall überprüft werden muss. Nach wie vor gibt es Anlagen, an denen bisher kein marktüblicher Analysator erfolgreich eingesetzt werden konnte. Das Forschungsinstitut steht in engem Kontakt mit den Anlagenbetreibern und den Herstellern der Analysengeräte, um die Probleme zu lösen.

Weiterhin wurden vom Forschungsinstitut Messungen der Feinstaubemissionen an den Kaminen der Drehöfen durchgeführt. Die Abgasreinigungseinrichtungen der Drehofenanlagen entsprechen heute in hohem Maße dem Stand der Technik. Nur so können die strengen nationalen Vorgaben bezüglich der Staubemissionsgrenzwerte sicher eingehalten werden. Durch das insgesamt niedrige Emissionsniveau haben Staubemissionen der Drehöfen praktisch keine Immissionsrelevanz mehr. Dennoch sind Kenntnisse über den Feinstaubgehalt in den Emissionen der Klinkerdrehöfen im Hinblick auf die allgemeine Staubsituation von Bedeutung.

Untersuchungen zu verschiedenen Maßnahmen zur Stickoxidreduktion hatten unter anderem die Minderungspotentiale einer gestuften Verbrennung in Zyklonvorwärmanlagen mit Calcinatoren zum Gegenstand. Auch die Möglichkeiten der selektiven nicht-katalytischen Stickoxidreduktion wurden weiter untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass dieses Reduktionsverfahren unter optimierten Bedingungen ein hohes Minderungspotential besitzt.



Gesetzgebung ■

Auswirkungen der novellierten 17. BImSchV auf die Zementindustrie

Am 20.08.2003 ist die novellierte Fassung der Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen (17. BImSchV) in Kraft getreten. Damit wurden vom deutschen Gesetzgeber die Vorgaben der europäischen Abfallverbrennungsrichtlinie 2000/76/EG in nationales Recht umgesetzt. Für Altanlagen gelten die Anforderungen der novellierten 17. BImSchV ab dem 28.12.2005. Nicht zuletzt durch zahlreiche Änderungsgenehmigungen im Zusammenhang mit dem in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegenen Einsatz von Ersatzbrennstoffen hat die 17. BImSchV allerdings bereits auch für Bestandsanlagen ihre Wirkung entfaltet. Somit liegen zwischenzeitlich erste Erfahrungen aus dem praktischen Vollzug der novellierten 17. BImSchV vor.

Die novellierte 17. BImSchV stellt an Mitverbrennungsanlagen (Zement- und Kraftwerke) die gleichen Anforderungen wie an reine Müllverbrennungsanlagen. Zementwerke müssen auf Grundlage der Novelle für sämtliche Spurenelemente sowie für Dioxine und Furane, HCl und HF sowie grundsätzlich auch für SO_2 , Gesamtkohlenstoff und CO die gleichen strengen Grenzwerte einhalten wie Müllverbrennungsanlagen. Die im alten Recht noch verankerte Mischungsrechnung zur Festlegung von Emissionsbegrenzungen für Mitverbrennungsanlagen ist praktisch entfallen.

Den prozessspezifischen Randbedingungen des Klinkerbrennens als Stoffumwandlungsprozess wird in der Verordnung dadurch Rechnung getragen, dass auf Antrag des Betreibers Ausnahmen für bestimmte rohmaterialbedingte Emissionen zu gewährt sind. In diesen Fällen muss nachgewiesen werden, dass die entsprechenden Emissionen nicht durch die Verbrennung von Abfällen hervorgerufen werden. Solche rohmaterialbedingten Ausnahmen sind für SO_2 , Gesamtkohlenstoff, CO und unter bestimmten Randbedingungen auch für Quecksilber möglich.

Für Quecksilber ist von Zementdrehofenanlagen, in denen Abfälle energetisch verwertet werden, grundsätzlich ein Tagesmittelwert von $0,03 \text{ mg/m}^3$ und ein Halbstundenmittelwert von $0,05 \text{ mg/m}^3$ einzuhalten. Aufgrund der standortspezifisch stark schwankenden Quecksilbereinträge über die natürlichen Rohmaterialien ist es für Zementdrehofenanlagen auch bei strikter Einhaltung des Stands der Technik nicht

immer möglich, diese hohen Anforderungen zu erfüllen. Um eine Ausnahme von diesen strengen Regelungen zu erhalten, ist vom Betreiber der Nachweis zu führen, dass die Ursache für die höheren Quecksilberemissionen in der Zusammensetzung der Rohstoffe liegt. Das Forschungsinstitut konnte zwischenzeitlich über eine Vielzahl von Bilanzen nachweisen, dass die Quecksilbereinträge beim Klinkerbrennen zu ca. 80 % aus den natürlichen Rohmaterialien stammen. Bei einer solchen Bilanz werden über einen bestimmten Zeitraum sämtliche Eingangsstoffe (Roh- und Brennstoffe) beprobt und auf ihre Quecksilbergehalte untersucht. Auf Grundlage dieser Daten kann der Beitrag der Rohmaterialien zum Quecksilbereintrag und damit auch zu den Hg-Emissionen ermittelt werden. Als obere Begrenzung für die Festlegung von Quecksilberemissionen an Drehofenanlagen der Zementindustrie sieht die 17. BImSchV im Einklang mit europäischem Recht einen Wert von $0,05 \text{ mg/m}^3$ vor.

Für die Emissionen an Gesamtkohlenstoff und CO sind zukünftig auf Grundlage der novellierten Verordnung ebenfalls Emissionsgrenzwerte festzulegen. Die 17. BImSchV sieht dabei zunächst für die Emissionen an Gesamtkohlenstoff (TOC) einen Grenzwert von 10 mg/m^3 (Tagesmittelwert) vor; für CO soll eine Emissionsbegrenzung von 50 mg/m^3 , ebenfalls im Tagesmittel, eingehalten werden. Diese Grenzwerte stellen bei Feuerungsanlagen den vollständigen Ausbrand der Brennstoffe sicher. Drehofenanlagen der Zementindustrie sind hingegen Stoffumwandlungsanlagen. Organische Bestandteile in den Rohmaterialien führen zu höheren Emissionskonzentrationen, obwohl die Verbrennungsbedingungen einen vollständigen Ausbrand der Brennstoffe gewährleisten. Deshalb hat der Gesetzgeber für Zementwerke die Möglichkeit vorgesehen, auch für CO und Gesamtkohlenstoff entsprechende rohmaterialbedingte Ausnahmen zu beantragen.

Dieses Vorgehen steht im Einklang mit der Auffassung, die der Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI) noch im Zusammenhang mit der „alten“ 17. BImSchV vertreten hatte. Im Jahr 1994 hatte der LAI in seinen Zweifelsfragen zur Auslegung und Anwendung der 17. BImSchV vorgeschlagen, auf die Festlegung von Emissionsbegrenzungen für Gesamtkohlenstoff und CO ganz zu verzichten, wenn der Nachweis geführt werden kann, dass die entsprechenden Emissionen aus den Rohstoffen resultieren. Insofern stellt die neue Regelung, trotz der Möglichkeit Aus-

nahmen zu beantragen, eine Verschärfung der früheren Bestimmungen dar.

Entsprechende Rohmaterialuntersuchungen als Beleg für solche Ausnahmen werden vom Forschungsinstitut der Zementindustrie durchgeführt. Eine dort installierte Laboranlage gestattet es die Vorgänge zu simulieren, die sich bei der Erwärmung der Rohstoffe im Vorwärmer abspielen. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wird dann eine so genannte Emissionsprognose erstellt. Diese kann für die Beantragung von Ausnahmen herangezogen werden.

Für SO_2 sieht die novellierte 17. BImSchV ähnliche Regelungen wie für Gesamtkohlenstoff und CO vor. Die Beiträge der Rohmaterialien zu den SO_2 -Emissionen können ebenfalls über Simulationen in der Laboranlage bzw. über chemische Analysen in Verbindung mit Berechnungen abgeschätzt werden.

Abweichend von der europäischen Verbrennungsrichtlinie sieht die deutsche Umsetzung in der 17. BImSchV schärfere Anforderungen in Bezug auf Staub und NO_x vor. Danach ist für Drehofenanlagen, die mehr als 60 % der Feuerungswärmeleistung durch Abfälle substituieren, sowohl für Staub als auch für NO_x weiterhin eine Mischungsrechnung vorgesehen. Damit soll erreicht werden, dass Drehofenanlagen der Zementindustrie mit hohen Einsatzraten von Abfällen für NO_x und Staub strengere Grenzwerte einzuhalten haben. Zur Umsetzung dieser Vorgabe sieht die novellierte 17. BImSchV für Stickstoffoxide eine Übergangsfrist bis zum 30.10.2007 vor. Dieser Umstand ist für die Zementindustrie besonders wichtig, da gegenwärtig noch nicht sichergestellt ist, ob in der Zementindustrie eine Emissionsbegrenzung von 200 mg/m^3 für Stickstoffoxide mit Hilfe des derzeitigen Stands der Technik überhaupt eingehalten werden kann. In diesem Zusammenhang werden noch Versuche durchzuführen sein.

Die novellierte 17. BImSchV bedeutet im Vergleich zur Vorgänger-Verordnung eine weitere Verschärfung der Umweltauflagen für Drehofenanlagen, die Abfälle mitverbrennen. Eine Zusammenstellung aller Emissionen der deutschen Zementwerke erfolgt in den „Umweltdaten“, die einmal jährlich vom Verein Deutscher Zementwerke zusammengestellt und veröffentlicht werden. Dort ist auch jeweils eine Übersicht über die in der deutschen Zementindustrie eingesetzten Abfälle zu finden.

REACH

Im Oktober 2003 hat die EU-Kommission einen Verordnungsentwurf über ein System zur Registrierung, Bewertung und Zulassung von chemischen Stoffen (Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals, die so genannte REACH-Verordnung) beschlossen, mit dem die europäische Chemikalienpolitik neu geregelt werden soll. Die geplanten Regelungen werden absehbar massive Auswirkungen nicht nur auf die Chemie-Industrie, sondern auf die gesamte Wirtschaft haben. Insbesondere werden neben der chemischen Industrie auch andere Industriezweige unmittelbar von den Regelungen betroffen sein, da zumindest im derzeitigen Entwurf der REACH-Verordnung auch zahlreiche Stoffe wie z. B. Zement und Kalk betrachtet werden. Folglich stellt REACH im Kern eher den Versuch einer Neuregelung der europäischen Stoffpolitik dar. Die geplante Verordnung soll mehr als 40 bestehende Richtlinien und Verordnungen ersetzen. Das Kernstück ist dabei das so genannte REACH-System, ein integriertes Vorgehen zur Registrierung, Evaluierung und Zulassung chemischer Stoffe. Unternehmen, die Chemikalien und bestimmte andere Stoffe herstellen oder importieren, sollen verpflichtet werden, die mit deren Verwendung verbundenen Risiken zu bewerten und Maßnahmen zur Beherrschung der von ihnen erkannten Risiken zu treffen. Damit würde die Pflicht zur Gewährleistung der Sicherheit beim Umgang mit den durch REACH geregelten Stoffen vollständig vom Staat auf die Wirtschaft verlagert werden.

Die Zementindustrie wäre nach derzeitigem Stand in zweifacher Hinsicht von REACH betroffen: einerseits als Hersteller eines registrierungspflichtigen Produkts (Klinker) und andererseits als Verwender („Downstream user“) bereits registrierter Stoffe wie z. B. Mahlhilfsmittel oder Hütensand. Das genaue Ausmaß der Auswirkungen auf die Zementindustrie ist zurzeit noch nicht absehbar, da von vielen Seiten (Industrie, Politik, Umweltverbände) Änderungen im Verordnungsentwurf gefordert werden. Eine Verabschiedung der Verordnung durch das Europäische Parlament und den Europäischen Rat wird daher erst für 2006 erwartet. Um der eigenen Position das nötige Gewicht zu verleihen, hat sich die Zementindustrie durch ihren europäischen Verband „CEMBUREAU“ mit 11 weiteren Industrieverbänden zur so genannten „REACH-Allianz“ zusammengeschlossen. Dazu gehören die Kalk-, Gips-, Fertigbeton-, Transportbeton-, Mineralstoff-, Erz-, Papier-, Keramik-, Glas- und Nichtei-

senmetallindustrie sowie die Stahl- und Eisen-Industrie. Gemeinsam umfassen die Industrien einen Wirtschaftssektor mit 2 Mio. Beschäftigten, 360 Mrd. € Umsatz und einer Produktion von 1 500 Mio. Tonnen pro Jahr. Die gesamte weltweite Jahresproduktion an Chemikalien beträgt dagegen nur etwa 400 Mio. Tonnen. In einer gemeinsamen Stellungnahme wurde der Politik dargelegt, dass REACH signifikante Auswirkungen auf die genannten „Nicht-Chemie“-Industrien haben wird. Zwar werden das Grundanliegen von REACH und die bedeutende Rolle der Sicherheitsdatenblätter für die Informationsweitergabe begrüßt, jedoch gibt es fundamentale Kritik an einigen Inhalten des Verordnungsentwurfs.

Obwohl ursprünglich für von Menschen gemachte „organische“ Chemikalien konzipiert, sollen von REACH jetzt auch natürliche Produkte und Rohstoffe betroffen sein. So sind die Ausgangsstoffe der „REACH-Allianz“-Industrien, nämlich Mineralien, Erze und andere in der Natur vorkommende Stoffe sowie wiederverwertete Materialien und Abfälle, gegenwärtig von REACH erfasst, die Ausgangsstoffe der chemischen Industrie – Gas, Rohöl und Kohle – hingegen nicht. Hier besteht eine Ungleichbehandlung. Auch wird nicht berücksichtigt, dass die potentiellen Risiken der zumeist anorganischen Rohstoffe und Produkte bereits durch andere Gesetze geregelt sind. Für Zement und die anderen Baustoffe gilt die Bauproduktenrichtlinie (89/106/EG).

Weitere Bedenken gibt es hinsichtlich der Bewertung der Stoffe nach Menge anstatt nach Risiko. Bei Zement und den meisten anderen anorganischen Produkten handelt es sich um Produkte mit geringen Risiken, aber hohem Mengenaufkommen. Nach den bisherigen Plänen würden sie aufgrund der hohen Massenströme unter die Kategorie der strengsten Anforderungen fallen. Hier fordert die Allianz einen modifizierten Bewertungsmaßstab, der das Risiko in den Vordergrund stellt. Weiterhin ist unklar, ob von REACH auch Abfälle, Recycling- und Sekundärstoffe betroffen sein werden. Die Verwertung dieser Stoffe ist ein wichtiger Bestandteil im Rahmen des Nachhaltigkeitskonzepts der Zementindustrie. Eine Erfassung durch REACH würde auch für diesen Sektor Doppelregelungen bedeuten und unweigerlich die derzeitige Verwertungspraxis ungünstig beeinflussen. Es ist daher ein wesentliches Ziel der Zementindustrie, gemeinsam mit der REACH-Allianz eine Zurücknahme der Registrierungspflicht für Zemente und an-

dere anorganisch-mineralische Stoffe, die durch mineralogische bzw. physikalisch-chemische Prozesse erzeugt werden, zu erreichen. Darüber hinaus sollten auch Stoffe, die unter dem Regime der Richtlinie zur Verbrennung von Abfällen (2000/76/EG) eingesetzt werden, vollständig aus dem Anwendungsbereich von REACH herausgenommen werden.

DIN EN 14181 – neue Norm für die kontinuierliche Emissionsüberwachung

Im September 2004 ist die neue Europäische Norm DIN EN 14181 „Emissionen aus stationären Quellen – Qualitätssicherung automatischer Messeinrichtungen“ erschienen. Die Norm beschreibt Umfang und Ablauf der jährlichen Funktionsprüfung und der alle 3 Jahre durchzuführenden Kalibrierung. Zusätzlich werden in Zukunft allerdings auch vom Anlagenbetreiber regelmäßig Qualitätskontrollen an den kontinuierlichen Emissionsmessgeräten durchzuführen sein, deren Umfang ebenfalls in der neuen Norm beschrieben wird. Durch die neuen Vorgaben wird eine europaweit einheitliche Vorgehensweise bei der Prüfung und Überwachung kontinuierlich arbeitender Emissionsmessgeräte angestrebt. Für Anlagen, die der 17. BImSchV unterliegen, gilt eine Übergangsfrist für die Umsetzung der DIN EN 14181 bis Dezember 2005. TA Luft-Anlagen fallen offiziell erst nach der Überarbeitung der VDI 3950, Blatt 1 unter die neue Norm.

In der neuen Norm findet sich eine Reihe von zusätzlichen Anforderungen, die insbesondere den Ablauf und die Auswertung von Kalibrierungen betreffen. Darüber hinaus werden die vom Betreiber zu erfüllenden Anforderungen an die laufende Qualitätssicherung deutlich erhöht. Die DIN EN 14181 legt 3 so genannte Qualitätssicherungsstufen (QAL 1 bis QAL 3) und eine jährliche Funktionsprüfung für automatische Emissionsmeseinrichtungen fest. Die QAL 1 fordert den in Deutschland schon lange üblichen Einsatz eignungsgeprüfter Messeinrichtungen. Die QAL 2 umfasst den ordnungsgemäßen Einbau und die Kalibrierung der automatischen Messeinrichtung mit Standardreferenzmessverfahren sowie die Ermittlung der Messunsicherheit nach einem genau festgelegten Verfahren. Die QAL 3 betrifft vom Betreiber durchzuführende regelmäßige Driftkontrollen. Eine konkrete Vorgabe hinsichtlich der Häufigkeit dieser Überprüfungen ist in der Norm nicht enthalten.

Im Vergleich zur bisherigen Praxis ist es bei Kalibrierungen zukünftig erforderlich, die Messungen über 3 Tage und einen Zeitraum von jeweils mindestens 8 Stunden zu verteilen. Dabei sind mindestens 15 Proben zu nehmen. Falls eindeutige und unterscheidbare Betriebszustände vorliegen, sind zusätzliche Messungen durchzuführen und entsprechende Kalibrierfunktionen zu erstellen. Die jährlich durchzuführende Funktionsprüfung wird zu einer „kleinen“ Kalibrierung erweitert, indem dabei jeweils 5 Messungen mit dem Standardreferenzmessverfahren durchzuführen sind. Dadurch wird der mit Kalibrierungen und Funktionsprüfungen verbundene Arbeits- und Zeitaufwand deutlich erhöht.

Die Kalibrierfunktion ist nur in einem eingeschränkten Bereich gültig. Der Gültigkeitsbereich reicht von 0 bis zum 1,1-fachen des bei den Vergleichsmessungen aufgetretenen Maximalwerts. Die Einhaltung des gültigen Kalibrierbereichs ist vom Anlagenbetreiber wöchentlich zu prüfen. Eine vollständig neue Kalibrierung ist durchzuführen, wenn mehr als 5 % der Messwerte pro Woche (Zeitraum Montag bis Sonntag) über einen Zeitraum von mehr als 5 Wochen oder mehr als 40 % der Messwerte innerhalb 1 Woche außerhalb des gültigen Kalibrierbereichs liegen.

Die bislang übliche Ermittlung des Vertrauens- und Toleranzbereichs nach VDI 3950, Blatt 1 entfällt. Dafür sind Messunsicherheiten / Variabilitäten zu ermitteln und mit den im Anhang III der 17. BImSchV genannten Werten zu vergleichen. Jeder Halbstundenmittelwert wird auf Normbedingungen und gegebenenfalls den Sauerstoffbezugswert umgerechnet. Die Messunsicherheit wird von diesem normierten Wert subtrahiert. Erst danach erfolgt die Klassierung der Werte. Bei der Klassierung der Halbstunden- und Tagesmittelwerte wird jeweils der Gültigkeitsbereich der Kalibrierfunktion berücksichtigt. Werte außerhalb des gültigen Kalibrierbereichs werden in gesonderten Klassen erfasst. Um alle Forderungen der Norm vollständig umsetzen zu können, müssen die Emissionsrechner mit einer neuen Auswertesoftware ausgestattet werden.

Aufgrund der noch laufenden Übergangsfristen liegen bisher noch keine umfassenden Erfahrungen mit der neuen DIN EN 14181 vor. Es ist allerdings abzusehen, dass sich der Aufwand im Zusammenhang mit der Überwachung und der Überprüfung kontinuierlich arbeitender Emissionsmessgeräte deutlich erhöhen wird. Dies gilt sowohl für die Tätigkeiten der be-

kanntgegebenen Messinstitute als auch für die internen Wartungsarbeiten beim Betreiber. Gleichfalls bleibt abzuwarten, ob die europäische Norm tatsächlich in sämtlichen Mitgliedsstaaten der europäischen Gemeinschaft mit der gleichen Intensität umgesetzt werden wird. Sollte dies nicht der Fall sein, so würden sich in Ländern mit einer strengen Umsetzung ein deutlich höherer Aufwand und damit deutlich höhere Kosten für die Geräteüberwachung einstellen, als dies in Ländern mit einer weniger stringenten Umsetzung der Fall wäre.

DIN EN 13284

Im November 2001 ist die Europäische Norm EN 13284-1 „Emissionen aus stationären Quellen – Ermittlung der Staubkonzentration bei geringen Staubkonzentrationen, Teil 1: Manuelles gravimetrisches Verfahren“ erschienen. Im September 2004 ist die Norm um Teil 2, „Automatische Messeinrichtungen“, ergänzt worden. Die EN 13284-1 legt ein Konventionsverfahren zur Messung geringer Staubkonzentrationen in geführten Gasströmen im Konzentrationsbereich unterhalb 50 mg/m³ fest und wurde insbesondere für den Bereich um 5 mg/m³ auf der Basis einer Probenahmedauer von einer halben Stunde validiert. Teil 2 der Norm beschreibt die Qualitätssicherung von automatischen Messeinrichtungen zur Ermittlung von Staub in Abgasen.

Als europäische Norm ist der EN 13284 bei der Ermittlung der Emissionen ein höherer Stellenwert einzuräumen als den nationalen VDI-Richtlinien. Die bisher im Wesentlichen bei Staubmessungen heranzuziehenden VDI-Richtlinien der Reihe 2066 werden deshalb zurzeit EN 13284-konform überarbeitet. Im Vergleich zu den bisher auf Grundlage der VDI-Richtlinien durchgeführten Messungen bringen die europäischen Normen verschiedene Neuerungen mit sich, die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Die Abgaseinlaufstrecke muss auf Grundlage der neuen europäischen Vorgaben jetzt dem 5fachen hydraulischen Durchmesser entsprechen. Auf Grundlage des alten Regelwerks genügte in der Vergangenheit eine Strecke von lediglich dem 3fachen hydraulischen Durchmesser. Für die Auslaufstrecke reicht es hingegen nun, dass diese nur noch das Doppelte des hydraulischen Durchmessers beträgt. Endet hinter der Messebene allerdings der Abgaskanal, so ist auch für die Auslaufstrecke zukünftig der 5fache hydraulische Durchmesser vorgesehen. Diese neuen Vorgaben haben erhebliche Konsequenzen für eine Vielzahl von Messstellen.

Ein Eingriff in die Abgasreinigungseinrichtungen während der Kalibrierung eines Staubmessgeräts ist auf Grundlage der neuen Normen erst nach vorheriger Absprache mit der Behörde möglich. Weiterhin sind in Analogie zur DIN EN 14181 zukünftig auch bei Funktionsprüfungen von Staubemissionsmessgeräten zusätzlich Vergleichsmessungen nach dem Standardreferenzverfahren (Einzelmessungen) durchzuführen. Dabei kann die Anzahl von 5 auf 3 Einzelmessungen begrenzt werden, wenn der Kalibrierbereich bei weniger als 30 % des Emissionsgrenzwerts endet.

Als Fazit ist festzuhalten, dass auch die europäischen Normen 13284 Blatt 1 und Blatt 2 zu einem höheren Aufwand und damit letztlich auch zu höheren Kosten im Zusammenhang mit der Überwachung von Staubemissionsmessgeräten im Vergleich zu den bisherigen Regelungen führen werden.

Klimaschutz ■

Von der Selbstverpflichtung zum Emissionshandel

Im November 2000 hatten die deutsche Bundesregierung sowie Spitzenverbände der deutschen Wirtschaft eine Weiterentwicklung der Vereinbarung zum Klimaschutz beschlossen, an der sich auch die deutsche Zementindustrie beteiligt. Im Rahmen dieser Klimavereinbarung hatte die Bundesregierung als Gegenleistung unter anderem zugesagt, die Industrie bei der Entscheidung über die Einführung weiterer Instrumente wie den Emissionshandel zu beteiligen. Im Jahr 2001 veröffentlichte die EU-Kommission das Grünbuch zum Emissionshandel, das den Startpunkt zur Formulierung der Emissionshandels-Richtlinie auf europäischer Ebene darstellte. Die deutsche Zementindustrie hat sich von Beginn an äußerst skeptisch gegenüber diesem Instrument geäußert. Grund hierfür war nicht eine Ablehnung des Emissionshandels als Instrument an sich. Vielmehr wird befürchtet, dass die Ausgestaltung dieses Instruments zu neuen Wettbewerbsnachteilen für die europäische Industrie, insbesondere die energieintensive Industrie, führen wird.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen der Selbstverpflichtung einerseits und dem Emissionshandel andererseits besteht in dem Niveau, auf dem die beiden Instrumente organisiert sind. Die Selbstverpflichtung zum Klimaschutz ist auf Branchenebene angelegt und ermöglicht so die Durchführung von Maßnahmen dort, wo sie am kostengünstigsten sind.

Der Emissionshandel ist auf Anlagenebene angelegt und gibt der Industrie somit eine wesentlich geringere Flexibilität bei der Wahl ihrer Maßnahmen. Darüber hinaus ist die Zementindustrie aufgrund der geringeren Wertschöpfung ihrer Produkte im Vergleich zu anderen Industriebranchen besonders hart betroffen.

Des Weiteren beziehen Selbstverpflichtung und Emissionshandel sich auf unterschiedliche Bilanzräume. Die CO₂-Emissionen der Zementindustrie setzen sich einerseits aus den direkten Emissionen aus der Verbrennung fossiler und sekundärer Brennstoffe sowie aus der Entsäuerung des Kalksteins und andererseits aus der indirekten Emission aus dem Stromverbrauch zusammen. Das Ziel der Selbstverpflichtung ist die Minderung der energiebedingten CO₂-Emissionen der Zementindustrie. Diese umfassen die direkten Emissionen aus den fossilen Brennstoffen sowie die indirekten Emissionen aus dem elektrischen Energieverbrauch. Demgegenüber schließt der Emissionshandel die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung fossiler und abfallstämmiger (Sekundär-)Brennstoffe sowie die prozessbedingten Emissionen ein (siehe Bild II-1).

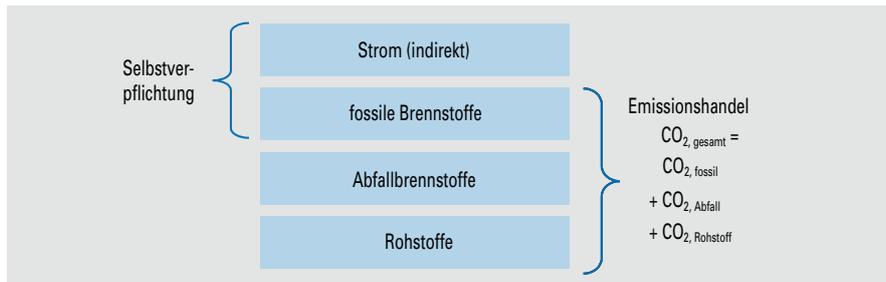


Bild II-1: Geltungsbereiche von Selbstverpflichtung und Emissionshandel

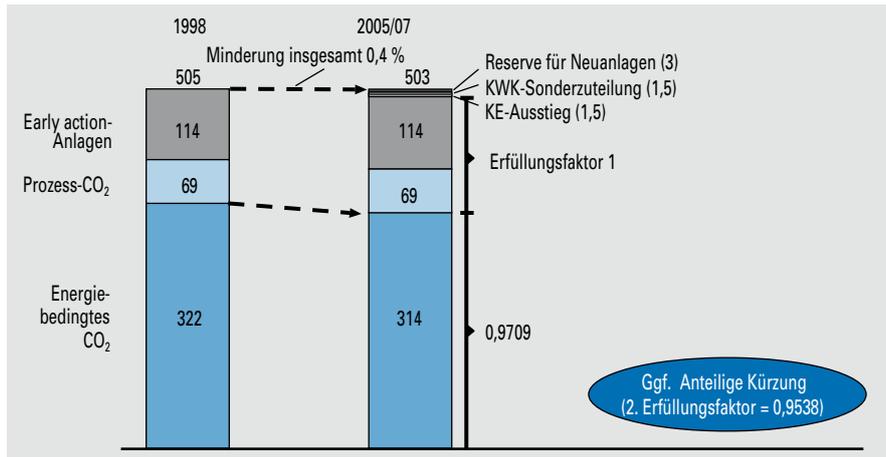


Bild II-2: Erfüllungsfaktor im deutschen Zuteilungsgesetz 2007

Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass das Monitoring im Rahmen der Selbstverpflichtung alle Zementwerke – einschließlich der Mahlwerke ohne Klinkerproduktion – umfasst, der Emissionshandel dagegen nur die Werke mit Klinkerproduktion. Letztlich kommen zum Teil unterschiedliche Emissionsfaktoren für die Brennstoffe zur Anwendung. Somit sind die in unterschiedlichen Berichtssystemen veröffentlichten Daten nicht miteinander vergleichbar, jedoch ineinander umrechenbar.

Ausgestaltung des Emissionshandels

Am 1. Januar 2005 hat in der Europäischen Union der CO₂-Emissionshandel begonnen. Die Zementindustrie unterliegt wie die meisten anderen energieintensiven Branchen diesem neuen Klimaschutzpolitischen Instrument. Aufgrund einer verspäteten Zuteilung der Emissionsrechte sowie einer ebenso verspäteten Freigabe des Registers durch die Europäische Kommission konnte der tatsächliche Handel in Deutschland allerdings erst im Laufe des Frühjahr 2005 beginnen.

Am 31. März 2004 hatte das Bundeskabinett den Nationalen Allokationsplan (NAP) für die Bundesrepublik verabschiedet und am selben Tag nach Brüssel übermittelt. Der NAP wurde im Laufe des Jahres 2004

mit dem Treibhausgas-Emissionshandels-gesetz (TEHG), dem Zuteilungsgesetz 2007 (ZuG 2007) und der Zuteilungsverordnung (ZuV) in deutsches Recht umgesetzt. Der Allokationsplan sieht eine Verminderung der CO₂-Emissionen von Industrie- und Energiewirtschaft in der 1. Handelsperiode (2005 bis 2007) von 505 auf 503 Mio. t CO₂/a vor (siehe Bild II-2). In der 2. Handelsperiode (2008 bis 2012) soll die Reduzierung auf 495 Mio. t/a erfolgen. Dies entspricht einer Minderung von 0,4 % in der 1. und weiteren 1,6 % in der 2. Handelsperiode.

Prozessbedingte Emissionen sowie Emissionen aus so genannten Early-action-Anlagen brauchen im gesamten Zeitraum bis 2012 nicht vermindert zu werden. Daraus ergibt sich insgesamt für die verbleibenden energiebedingten CO₂-Emissionen eine Minderungsvorgabe von -2,91 % (entsprechend einem so genannten Erfüllungsfaktor von 0,9709). Da die Industrieunternehmen darüber hinaus insgesamt 14 Mio. t/a mehr beantragt haben, als insgesamt für den Emissionshandelssektor zur Verfügung stehen, kommt weiterhin die so genannte anteilige Kürzung („2. Erfüllungsfaktor“) für viele Anlagen zur Anwendung. Daraus

ergibt sich eine weitere Verminderung für die betroffenen Anlagen um 4,62 %. Insgesamt wurden 61 Mio. t CO₂ pro Jahr für prozessbedingte Emissionen anerkannt. Diese setzten sich aus 40 Mio. t/a für die Stahlindustrie sowie 21 Mio. t/a für die Zement-, Kalk- und Glasindustrie zusammen.

Bei der Zuteilung der Emissionsrechte sieht das ZuG für die Betreiber von Anlagen, die dem Emissionshandel unterliegen, eine Wahlmöglichkeit zwischen der Beantragung mittels Grandfathering oder Benchmarking vor. Beim Grandfathering erfolgt die Zuteilung auf Basis der Emissionen im Basiszeitraum 2000 bis 2002. Da die wirtschaftliche Situation der Zementindustrie in diesen Jahren äußerst schwierig und die Produktion vergleichsweise gering war, hätte die Zuteilung nach dem Grandfathering für viele Unternehmen eine dramatische Unterausstattung mit Emissionsrechten bedeutet. Für diese Unternehmen kann die so genannte Benchmarking-Methode zu einer höheren Zuteilung im Vergleich zum Grandfathering führen. Allerdings muss der Betreiber dafür akzeptieren, dass die Zuteilung auf der Basis „bestverfügbarer Technik“ erfolgt und am Ende der Zutei-

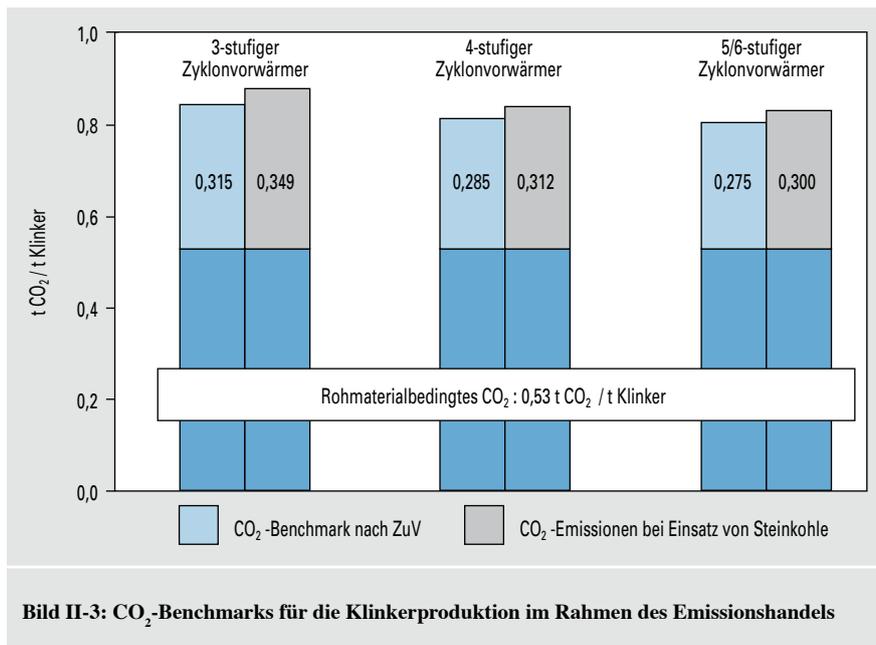


Bild II-3: CO₂-Benchmarks für die Klinkerproduktion im Rahmen des Emissionshandels

lungsperiode entsprechend der tatsächlichen Produktion angepasst wird. Eine Anpassung ist nur nach unten möglich.

Ein Benchmark, ausgedrückt als CO₂-Emissionen je t Zementklinker, setzt sich aus einem Wert für die Energieeffizienz einer Ofenanlage und einem spezifischen Emissionsfaktor zusammen. Das BAT-Papier für die Zementindustrie sieht für die Herstellung von Zementklinker einen Energieeffizienzwert von 3000 kgJ / kg Klinker als BAT vor. Dieser Wert wurde so niedrig festgelegt, dass er im Jahresdurchschnitt auch von modernsten Drehöfen nicht eingehalten werden kann. Allerdings werden für die Berechnung des CO₂-Benchmarks praxisnahe Energieeffizienzwerte verwendet. Diese berücksichtigen z. B. die Tatsache, dass der Brennstoffenergieverbrauch einer Zementdrehofenanlage von verschiedenen technischen Parametern, wie z. B. der Rohmaterialfeuchte, beeinflusst wird.

Bei der Festlegung eines Emissionsfaktors wird der tatsächliche durchschnittliche Brennstoffmix der Zementindustrie im Basiszeitraum 2000 bis 2002 zugrunde gelegt. Die daraus berechneten CO₂-Benchmarks (275 kg CO₂ / t Klinker für Ofenanlagen mit 5- bzw. 6-stufigem Zyklonvorwärmer, 285 kg CO₂ / t Klinker für Ofenanlagen mit 4-stufigem Zyklonvorwärmer bzw. 315 kg CO₂ / t Klinker für Ofenanlagen mit 3-stufigem Zyklonvorwärmer) liegen ca. 50 % höher als der ursprünglich vorgeschlagene Wert. Da er für Neuanlagen festgelegt wurde, führen diese Werte dennoch dazu, dass bestehende Anlagen, die eine Zuteilung nach der Benchmarking-

Methode erhalten, eine gewisse Unterausstattung in Kauf nehmen müssen. Bild II-3 zeigt die oben genannten festgelegten Benchmarks im Vergleich zu den spezifischen CO₂-Emissionen bei einem jeweils entsprechenden Brennstoffenergieverbrauch und bei Einsatz von Steinkohle. Aus dem Bild wird ersichtlich, dass die in der Zuteilungsverordnung festgelegten Benchmarks für die Zementindustrie von bestehenden Ofenanlagen nur erreicht werden können, wenn zum Teil biogene Brennstoffe eingesetzt werden.

Das Zuteilungsverfahren sieht eine entsprechende Beantragung von Emissionsrechten durch die Betreiber der betroffenen Anlagen vor. Hierfür mussten die Produktions- und Emissionsdaten für die Jahre 2000 bis 2002 aufbereitet und von einem anerkannten Verifizierer geprüft werden.

CO₂-Berichterstattung

Der nunmehr begonnene CO₂-Emissionshandel erfordert eine verlässliche, nachprüfbar und letztlich justiziable Berichterstattung der CO₂-Emissionen aller beteiligten Unternehmen. Um eine einheitliche Berichterstattung zu gewährleisten, hat die EU-Kommission „Leitlinien für Überwachung und Berichterstattung betreffend Treibhausgasemissionen“ verabschiedet. Diese enthalten unter anderem detaillierte Vorgaben für die Berichterstattung der CO₂-Emissionen für den Klinkerbrennprozess. Eine 1:1-Umsetzung dieser Leitlinien in die Praxis ist jedoch kaum möglich, da sie zum Teil technisch fehlerhaft sind und andererseits zu einem nicht verhältnismäßigen Analysenaufwand führen würden.

Die etablierten, bewährten Berichtserstattungssysteme der Zementunternehmen berücksichtigen die EU-Leitlinien für die CO₂-Berichterstattung nicht.

Das Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz sieht eine Arbeitsteilung zwischen Bund und Ländern vor. Den Ländern obliegt die Überwachung der CO₂-Emissionen, d. h. die Überprüfung der jährlichen Berichte sowie ggf. die Änderung von Genehmigungen. Aus diesem Grund hatte das Bundes-Umweltministerium auf eine bundesweite Verordnung zur Umsetzung der EU-Leitlinien verzichtet. Der Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI) hat deshalb Ende 2004 eine Arbeitsgruppe eingesetzt, die bundesweit einheitliche Regelungen erarbeiten soll. Diese werden jedoch erst im Laufe des Jahres 2005 oder später zur Verfügung stehen. Da die EU-Leitlinien in diesem Fall von den Überwachungsbehörden direkt anzuwenden sind, müssen diejenigen Unternehmen, die im Hinblick auf ihre CO₂-Berichterstattung von den Leitlinien abweichen wollen, vor Beginn der Handelsperiode einen entsprechenden Vorschlag für ihre Berichterstattung bei ihrer Genehmigungsbehörde einreichen. Um zumindest für die Zementindustrie einheitliche Regelungen zu erreichen, hat der VDZ eine Arbeitsgruppe eingesetzt, die einen gemeinsamen Vorschlag erarbeitet hat. Dieser Vorschlag wurde inzwischen auch vom europäischen Verband der Zementindustrie CEMBUREAU übernommen.

Die EU-Leitlinien sehen unterschiedliche Anforderungen an die Genauigkeit der zu ermittelnden Daten abhängig von der Gesamtemission einer Anlage vor. Die Unterteilung erfolgt in 3 Gruppen (bis zu 50 000 t CO₂/a, zwischen 50 000 und 500 000 t CO₂/a sowie über 500 000 t CO₂/a). Aufgrund der relativ hohen spezifischen CO₂-Emissionen des Klinkerbrennprozesses liegen alle deutschen Zementwerke mit Klinkerproduktion in den beiden letztgenannten Gruppen. Die in den EU-Leitlinien vorgeschriebenen Anforderungen an die Messgenauigkeit bzw. Methoden zur Ermittlung der brennstoffbedingten CO₂-Emissionen sehen vor, dass alle Zementwerke z. B. sämtliche festen Brennstoffe regelmäßig auf ihre Heizwerte bzw. Kohlenstoffgehalte analysieren müssen. Während die Analyse des Heizwerts im Werkslabor aus betriebstechnischen Gründen die Regel ist, sind die Elementaranalysen zusätzlich durchzuführen. Demgegenüber sieht der Vorschlag der Zementindustrie vor, soweit wie möglich mit statistisch abgesicherten Standardwerten zu rechnen und nur für diejenigen Stoffe Analysen durch-

zuführen, für die eine solche Datenbasis nicht vorliegt (siehe **Tafel II-1**). Darüber hinaus wird gefordert, dass die Analysen in akkreditierten Labors durchgeführt werden müssen. Da eine Analyse im Werkslabor demnach nicht zulässig wäre, würde diese Auflage zu deutlich erhöhten Kosten führen. Dasselbe gilt für die Ermittlung der prozessbedingten CO₂-Emissionen, für die entweder eine höchst genaue Messung der Klinkerproduktion oder repräsentative Bilanzierungen gefordert werden. Beides ist mit verhältnismäßigem Aufwand nicht möglich. Aus diesem Grund hat der VDZ die in der Zementindustrie bewährte kombinierte Methode aus einer Bilanzierung des Prozessinputs („Vorwärtsrechnung“) sowie eine Rückrechnung aus dem Zementversand vorgeschlagen (siehe **Bild II-4**). Dieser Vorschlag basiert letztlich auf einer genauen Verwiegung der Input-Stoffe, wie zugekaufte Brennstoffe oder Zumahlstoffe, über eine geeichte Eingangswaage. Die Rückrechnung aus dem Zementversand basiert ebenfalls auf der Verwiegung der ausgelieferten Produkte einer geeichten Versandwaage. Obwohl die Prozesswaagen im Klinkerbrennprozess bzw. dem Zementherstellungsprozesses die in den EU-Leitlinien geforderten Messgenauigkeiten nicht erreichen können, haben die Erfahrungen von FIZ-Zert im Rahmen der Verifizierung der CO₂-Emissionen der deutschen Zementwerke gezeigt, dass die Gesamtgenauigkeit aus den EU-Leitlinien mit dieser Methode eingehalten werden kann.

Entwicklung der CO₂-Emissionen

Das Treibhauspotential der Emissionen der Zementindustrie wird praktisch ausschließlich durch Kohlendioxid bewirkt. Andere Treibhausgase, so auch die im Kyoto-Protokoll genannten, treten bei der Zementherstellung nicht oder nur in extrem geringen Mengen auf. Beim Klinkerbrennprozess entstehen CO₂-Emissionen durch die Umsetzung von Brennstoffenergie zur Erzeugung von Prozesswärme. Darüber hinaus wird Brennstoffenergie für Trocknungsprozesse für andere Hauptbestandteile des Zements, wie z. B. Hüttensand, aufgewendet. Die spezifischen brennstoffbedingten CO₂-Emissionen sanken im Zeitraum 2000 bis 2003 von 0,195 auf 0,156 t CO₂ / t Zement. In absoluten Zahlen bedeutete dies eine Verminderung von 6,83 Mio. t CO₂/a auf 5,20 Mio. t CO₂/a. Hierin sind die CO₂-Emissionen aus dem Einsatz von Sekundärbrennstoffen – der Systematik der Selbstverpflichtung folgend – nicht berücksichtigt, da sie fossile Brennstoffe vollständig substituieren. Da die Abfälle ansonsten an anderer Stelle ihren Kohlenstoffgehalt

Tafel II-1: Bestimmung der brennstoffbedingten CO₂-Emissionen (Vorschlag der Zementindustrie)

Brennstoffe	Brennstoffmenge	Heizwert	Emissionsfaktor
Steinkohle	Methode: Einkauf	Analysen (Werkslabor ¹⁾ oder Lieferant)	Festwert (BMU / RISA)
Braunkohle	Methode: Einkauf	Analysen (Werkslabor ¹⁾ oder Lieferant)	Festwert (BMU / RISA)
Petrolkoks	Methode: Einkauf	Analysen (Werkslabor ¹⁾ oder Lieferant)	Festwert (BMU / RISA)
Heizöl S	Methode: Einkauf	Festwert (z.B. Norm)	Festwert (BMU / RISA)
Heizöl EL	Methode: Einkauf	Festwert (z.B. Norm)	Festwert (BMU / RISA)
Erdgas	Methode: Einkauf	Lieferantenangabe	Festwert (BMU / RISA)
Altreifen	Kombination: Methode Einkauf und Verwiegung vor Ofen	Festwert	Festwert (BMU / RISA)
Altöl / Lösemittel	Methode: Einkauf	Analysen (Werkslabor ¹⁾ oder Lieferant)	Analysen ²⁾
aufbereitete Fraktionen aus - Industrieabfällen - Siedlungsabfällen	Methode: Einkauf	Analysen (Werkslabor ¹⁾ oder Lieferant)	Analysen ²⁾
andere feste fossile Sekundärbrennstoffe	Methode: Einkauf	Analysen (Werkslabor ¹⁾ oder Lieferant)	Analysen ²⁾

¹⁾ externe Vergleichsanalyse, z.B. 4 x pro Jahr durch ein akkreditiertes Labor

²⁾ i. d. R. extern, z.B. 4 x pro Jahr, durch ein akkreditiertes Labor; mittelfristig ist die Festlegung statistisch abgesicherter Standardfaktoren (Festwerte) anzustreben

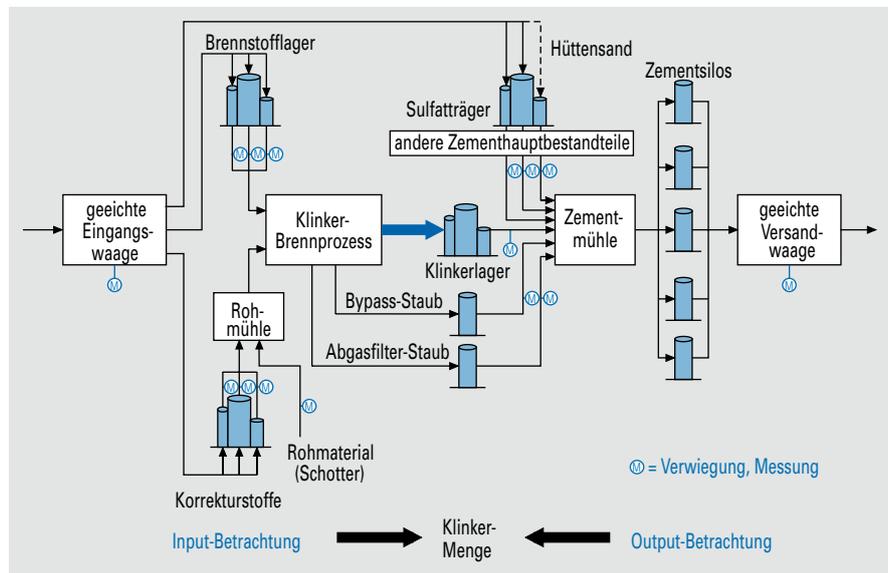


Bild II-4: Bestimmung der Klinkerproduktion im Rahmen der CO₂-Berichterstattung

zu CO₂ oder anderen Treibhausgasen freisetzen würden, führt der Einsatz von Sekundärbrennstoffen insgesamt zu einer Verminderung der CO₂-Emissionen.

In dieser Berücksichtigung der Sekundärbrennstoffe besteht ein wesentlicher Unterschied zur Berichterstattung im Rahmen

des Emissionshandels. Der Emissionshandel umfasst alle fossilen Brennstoffe sowie die fossilen Anteile der Abfallbrennstoffe. Nur die biogenen Anteile der Brennstoffe werden mit einem Emissionsfaktor von 0 gerechnet. Eine Substitution der traditionellen fossilen Brennstoffe Braun- und Steinkohle durch andere Brennstoffe mit

Tafel II-2: CO₂-Emissionen der Zementindustrie in den Jahren 2000 bis 2003

	Absolute CO ₂ -Emissionen in Mio. t/a				Spezifische CO ₂ -Emissionen in t CO ₂ /t Zement			
	2000	2001	2002	2003	2000	2001	2002	2003
Thermisch bedingt ¹⁾	6,83	5,78	5,16	5,20	0,195	0,179	0,168	0,156
Elektrisch bedingt	2,38	2,15	2,12	2,22	0,068	0,067	0,069	0,067
Rohstoffbedingt	15,10	13,37	12,70	13,37	0,431	0,415	0,413	0,401
Energiebedingt	9,21	7,93	7,28	7,42	0,263	0,246	0,237	0,223
Gesamt	24,31	21,30	19,98	20,81	0,694	0,661	0,650	0,624

¹⁾ ohne Sekundärbrennstoffe

Tafel II-3: Spezifische CO₂-Emissionen der deutschen Zementindustrie (in t CO₂ / t Zement)

Jahr	Emissionen aus thermischem Energieverbrauch ¹⁾	Emissionen aus elektrischem Energieverbrauch	Emissionen aus der Kalkstein- entsäuerung	Gesamt
1987	0,317	0,075	0,456	0,848
1990 ²⁾	0,280	0,072	0,450	0,802
1994	0,252	0,072	0,450	0,775
1995	0,254	0,071	0,451	0,776
1996	0,245	0,072	0,451	0,768
1997	0,231	0,070	0,453	0,754
1998	0,218	0,070	0,444	0,732
1999	0,199	0,068	0,427	0,694
2000	0,195	0,068	0,431	0,694
2001	0,179	0,067	0,415	0,661
2002	0,168	0,069	0,413	0,650
2003	0,156	0,067	0,401	0,624

¹⁾ ohne Sekundärbrennstoffe

²⁾ Basisjahr der freiwilligen Vereinbarung von 2000

niedrigeren spezifischen CO₂-Emissionen, wie z.B. Erdgas, ist aus Kostengründen nicht möglich. Da die Brennstoffkosten maßgeblich die Herstellkosten des Zements beeinflussen, gehen die Bestrebungen der Zementindustrie auch weiterhin dahin, fossile Brennstoffe verstärkt durch Abfallbrennstoffe zu ersetzen. Inwiefern zukünftig der Einsatz biogener Brennstoffe eine besondere Rolle spielen wird, bleibt abzuwarten.

Die im Rahmen der Selbstverpflichtung vereinbarten und verwendeten Emissionsfaktoren unterscheiden sich ebenfalls von den im Emissionshandel vorgeschriebenen Werten. Quantitativ weichen die Werte zwar nur geringfügig ab, allerdings ist die Differenzierung beim Emissionshandel deutlich stärker. Der elektrische Energieverbrauch macht etwa 10 % des gesamten Energieverbrauchs der Zementwerke aus. Als Primärenergie gerechnet ist der Anteil des elektrischen Energieverbrauchs – und damit der CO₂-Emissionen, die sich aus deren Einsatz ergeben – jedoch größer. Die durch den Stromverbrauch bedingte CO₂-

Emission betrug in den Jahren 2000 bis 2003 zwischen 0,067 und 0,069 t CO₂ / t Zement. In absoluten Zahlen nahm sie geringfügig von 2,38 (im Jahr 2000) auf 2,22 (im Jahr 2003) ab. Eine Eigenstromerzeugung findet in der deutschen Zementindustrie nur in sehr geringem Maße statt.

Rohstoffbedingte CO₂-Emissionen

Bei der Entsäuerung des wichtigsten Rohstoffs Kalkstein (chemisch CaO₃) wird CO₂ freigesetzt. Die je Tonne produzierten Klinkers erzeugte rohstoffbedingte CO₂-Emission hängt von der Rohstoffrezeptur ab, variiert aber nur in geringem Maße. Sie beträgt in Deutschland ca. 0,53 t CO₂ / t Klinker bzw. im Zeitraum von 2000 bis 2003 zwischen 0,401 und 0,431 t CO₂ / t Zement. Die gesamte rohstoffbedingte CO₂-Emission der deutschen Zementindustrie sank – vor allem aufgrund der verringerten Produktion – von 15,1 Mio. t CO₂ im Jahr 2000 auf 13,4 Mio. t CO₂ im Jahr 2003. Damit ergeben sich für den Berichtszeitraum die in **Tafel II-2** dargestellten spezifischen bzw. absoluten CO₂-Emissionen. Eine Verminderung der

rohstoffbedingten CO₂-Emissionen ist – bezogen auf die Tonne Zement – nur in begrenztem Maße durch die verstärkte Herstellung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen möglich. Bezogen auf die Tonne Klinker ist eine Reduzierung praktisch nicht möglich.

Zusammenfassend ergeben sich damit die in **Tafel II-3** zusammengestellten spezifischen CO₂-Emissionen der deutschen Zementindustrie für den Zeitraum 1987 bis 2003. Das Basisjahr für die auf die spezifischen energiebedingten CO₂-Emissionen umgestellte Selbstverpflichtung der Zementindustrie ist das Jahr 1990. Die Daten von 1987 werden zur Information mit angegeben.

Minderung gas- und staubförmiger Emissionen ■

Umweltdaten

Seit dem Jahr 1998 veröffentlicht der VDZ jährlich die „Umweltdaten der deutschen Zementindustrie“. Die aktuelle Ausgabe für das Jahr 2003 steht unter www.vdz-online.de im Bereich Publikationen / Umweltdaten als pdf-Datei zum Download zur Verfügung. Die Broschüre dokumentiert den Einsatz von Roh- und Brennstoffen zur Klinker- und Zementproduktion. Insbesondere werden die Einsatzmengen der Sekundärstoffe detailliert dargestellt. Der durchschnittliche Anteil der Sekundärbrennstoffe am gesamten Brennstoffenergieeinsatz betrug demnach im Jahr 2003 über 38 %.

Der inhaltliche Schwerpunkt der Umweltdaten liegt auf den Emissionen der Drehofenanlagen, die repräsentativ für die deutsche Zementindustrie dargestellt werden. Betrachtet werden neben der Komponente Staub auch die Abgaskomponenten NO_x und SO₂, die Spurenelemente und organische Abgasbestandteile. Deren Konzentrationen in den Reingasen sind ebenso wie die damit verbundenen Stofffrachten, das heißt die emittierten Mengen in kg/Jahr, grafisch aufbereitet. Sofern der jeweilige Stoff durch eine Messung bestimmbar war, sind eindeutige Angaben sowohl für die Konzentration als auch die Jahresfracht möglich. Bei nicht abgesicherten Messwerten oder Messungen unterhalb der Nachweisgrenze ist dies jedoch nicht möglich. In diesen Fällen wird keine Emissionskonzentration angegeben. Für die emittierte Fracht kann lediglich eine theoretische Obergrenze angegeben werden. Sie errechnet sich unter der Annahme, dass die Konzentration des Stoffs im Reingas die Nachweisgrenze erreicht.

Solche Abschätzungen mit Obergrenzen sind bei der Bestimmung der Spurenelementemissionen von Drehofenanlagen der Zementindustrie oft unausweichlich. Die Konzentrationen von Spurenelementen liegen wegen deren Verhalten im Klinkerbrennprozess sowie der hohen Abscheidungsleistung der Entstaubungsanlagen häufig unter der Nachweisgrenze des Messverfahrens. In **Bild II-5** werden beispielhaft die Emissionskonzentrationen in mg/m^3 des Spurenelements Thallium dargestellt. Insgesamt wurden im Jahr 2003 durch Messungen an 41 Ofenanlagen 96 Werte für die Thallium-Konzentration in den Reingasen ermittelt. Es sind jedoch lediglich die 9 abgebildeten Werte (Punkte) größer oder gleich der Nachweisgrenze, die je nach Mess- und Analysemethode zwischen $0,004$ und $0,006 \text{ mg}/\text{m}^3$ beträgt. In **Bild II-6** können daher nur für 4 Anlagen die Thallium-Frachten über die Konzentrationswerte und die Reingasvolumenströme (m^3/Jahr) eindeutig angegeben werden (Dreiecke). Für 37 Anlagen müssen die Emissionen über einen angenommenen Konzentrationswert von $0,004 \text{ mg}/\text{m}^3$ abgeschätzt werden (Linien). Die tatsächlich emittierten Frachten entsprechen nur im ungünstigsten Fall den gezeigten Obergrenzen, was insbesondere bei einer umweltpolitischen Bewertung der Zahlen berücksichtigt werden muss.

Verhalten von Spurenelementen im Klinkerbrennprozess

Die Spurenelementemissionen des Klinkerbrennprozesses sind gesetzlich begrenzt und durch entsprechende Obergrenzen in den Genehmigungen festgeschrieben. Dementsprechend müssen die Emissionen regelmäßig durch Messungen bestimmt und den überwachenden Behörden gemeldet werden. Die rechtliche Grundlage hierzu bilden die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) sowie, bei Einsatz von Sekundärbrennstoffen, die 17. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (17. BImSchV) (**Tafel II-4**). Weiterhin werden Zementprodukte, die in gesundheitsrelevanten Bereichen eingesetzt werden, dahingehend kritisch betrachtet, ob die enthaltenen Spurenelemente auch über längere Zeiträume in der Zementmatrix fest eingebunden bleiben. So werden beispielsweise im Trinkwasserbereich eingesetzte Betonbauteile Auslaugungstests unterzogen.

Spurenelemente werden sowohl über die Roh- als auch die Brennstoffe in den Zementklinkerbrennprozess eingetragen. In diesen Einsatzmaterialien liegen Spurenelemente in ihren natürlichen, geogen

Bild II-5: Messwerte (Jahr 2003) der Thallium-Konzentration im Reingas von 41 Drehofenanlagen

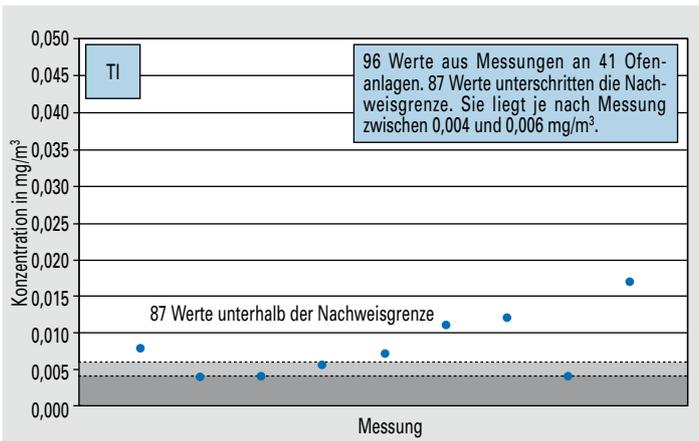
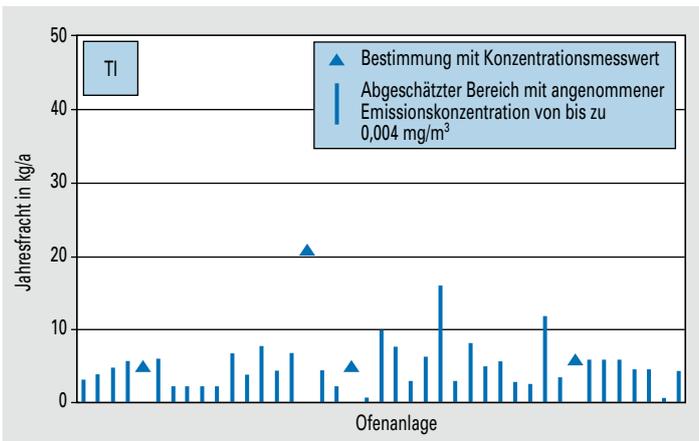


Bild II-6: Thallium-Emissionen (Jahresfrachten 2003) von 41 Drehofenanlagen



Tafel II-4: Grenzwerte für Spurenelementemissionen nach der TA Luft und der 17. BImSchV

Grenzwerte für Spurenelemente	TA Luft 2002 mg/m^3	17. BImSchV 2003 mg/m^3
Hg	0,05	0,03
Tl	0,05	0,05
Cd	0,05	0,5
As		
Ni, Co, Se, Te, Pb	0,5	0,5
Sb, Cr, Cu, Mn, V, Sn	1	

bedingten Konzentrationen vor. Der Haupteintrag erfolgt aufgrund des gegenüber den Brennstoffen etwa um den Faktor 10 höheren Massenstroms in der Regel über das Rohmaterial. Das Verhalten der Spurenelemente im Klinkerbrennprozess wird hauptsächlich durch die Flüchtigkeit ihrer Verbindungen bestimmt. Dabei sind nicht nur die in den Eintragsstoffen vorliegenden Bindungsformen, sondern ebenso die innerhalb der Ofenanlage neu gebildeten Verbindungen entscheidend. Zur Beurteilung des charakteristischen Verhaltens der Spurenelemente sind in der Vergangenheit an verschiedenen Stellen des Prozesses (Roh- und Reingas, Mehle, Stäube) teilweise sehr aufwendige Messungen durchgeführt worden. Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Unterteilung der Spurenelemente

und deren Verbindungen in 4 Klassen (nicht flüchtige, schwer flüchtige, leicht flüchtige und hoch flüchtige) sinnvoll ist.

Die nicht flüchtigen und die schwer flüchtigen Elemente haben praktisch keine Emissionsrelevanz und werden nahezu vollständig in den Klinker eingebunden. Beispiele für nicht flüchtige Schwermetalle sind: Arsen, Vanadium, Nickel, Chrom und Kupfer.

Schwer flüchtige Elemente, wie zum Beispiel Cadmium und Blei, können im Drehrohr verdampfen und – ähnlich wie Chlor, Schwefel und Alkalien – innere Kreisläufe ausbilden. Die Spurenelemente reagieren in der Gasphase zwischen Drehofen und Vorwärmer mit den zur Verfügung stehen-

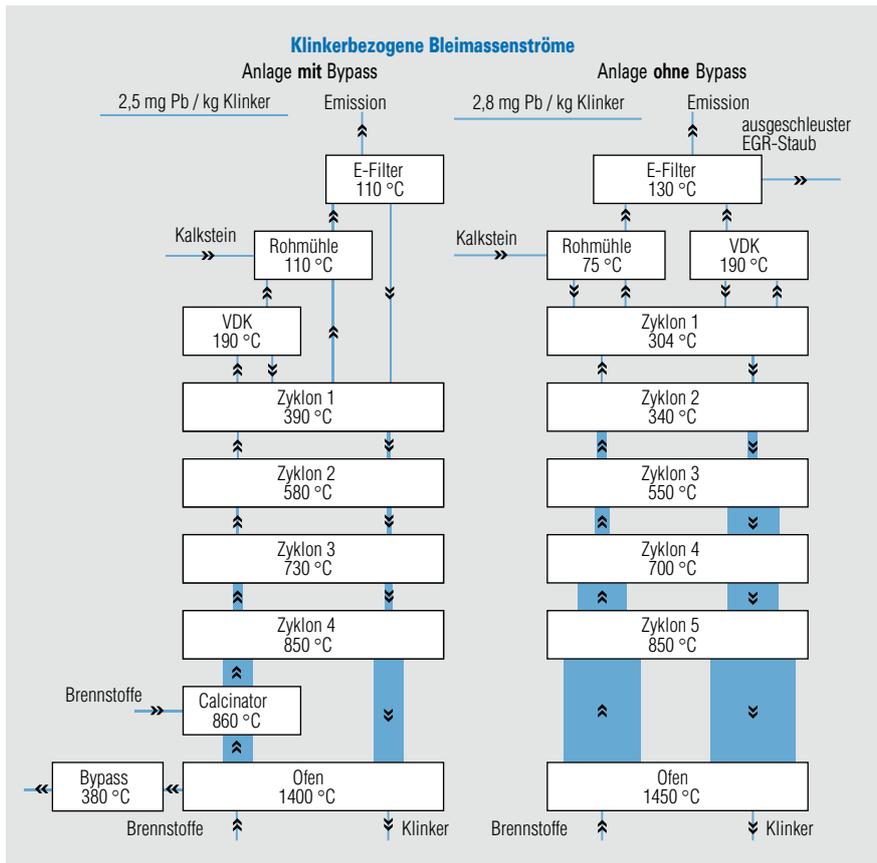


Bild II-7: Deutlich erhöhte Bleimassenströme in einer Anlage ohne Bypass und mit erhöhtem Chlorkreislauf gegenüber einer Bypassanlage mit moderatem Chlorkreislauf

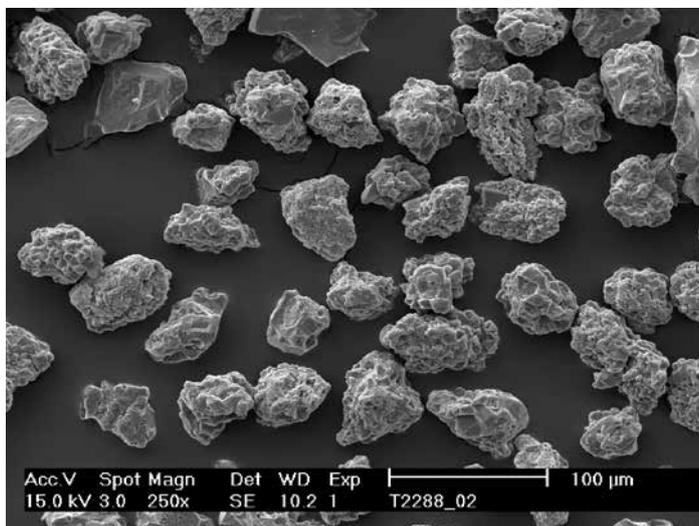


Bild II-8: ESEM-Aufnahme der Siebfraction mit Partikelgrößen zwischen 32 und 40 µm

den Chloriden und Sulfaten zu schwer flüchtigen Verbindungen. Im Vorwärmer kondensieren diese Verbindungen bei Temperaturen zwischen 700 und 900 °C aufgrund des hohen Oberflächenangebots an den Brenngutpartikeln. In Verbindung mit der hohen Abscheideeffizienz der Zyklonstufen ergibt sich ein Rückhaltevermögen des Wärmetauschers, das es schwer flüchtigen Spurenelementen und deren Verbindungen nur in sehr geringem Maße erlaubt,

das Ofensystem mit dem Rohgas zu verlassen. Vielmehr werden diese Verbindungen in kondensierter Form erneut in den Ofen transportiert, um dort zum überwiegenden Teil mit dem Klinker ausgetragen zu werden. Der Teil, der erneut im Ofen verdampft, trägt wieder zu dem Kreislauf zwischen Ofen und Vorwärmer bei. Die Ausbildung dieses inneren Kreislaufs, in dem die schwer flüchtigen Elemente lokal angereichert werden, ist dabei vom Reak-

tionsangebot an Sulfaten und Chloriden abhängig.

Für das leicht flüchtige Element Thallium können Anreicherungen in den Heißmehlen der oberen beiden Zyklonstufen festgestellt werden. Im unteren Bereich des Vorwärmers oder gar im Klinker ist Thallium nur selten nachweisbar. Vielmehr verdampfen das Spurenelement und seine Verbindungen im Bereich der oberen Zyklonstufen und werden mit dem Rohgas in die Anlagenteile des äußeren Kreislaufs, den Verdampfungskühler, die Rohmahlanlage und den Staubabscheider, transportiert. Durch die Absenkung der Temperatur und den intensiven Kontakt zwischen Gas und Feststoff kondensiert das Thallium nahezu vollständig an den Mehlpartikeln und ist selten emissionsrelevant. Es reichert sich vielmehr in den Stäuben des Verdampfungskühlers und des Staubabscheiders an und wird mit dem Ofenmehl erneut in den Wärmetauscher aufgegeben. Zur Entlastung dieses Kreislaufs werden die abgeschiedenen Mehle teilweise ausgeschleust und am Ofen vorbei zur Zementmühle geleitet.

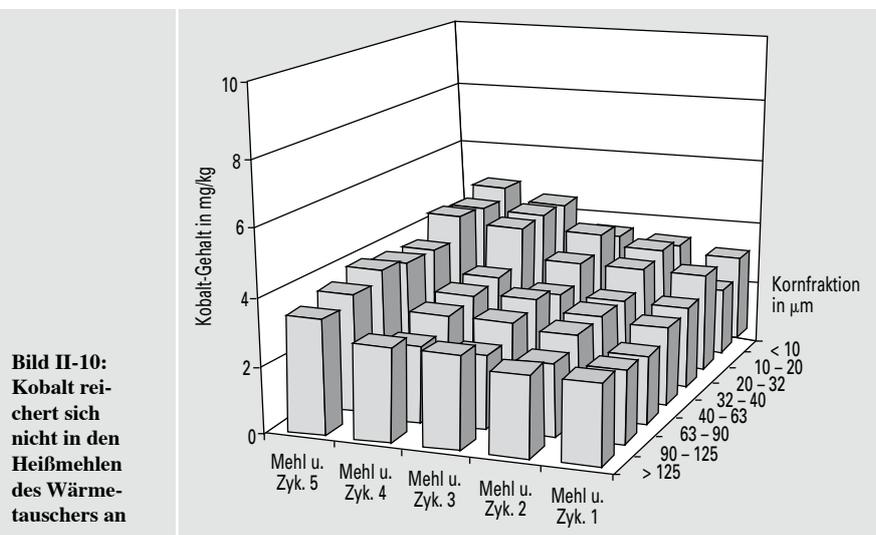
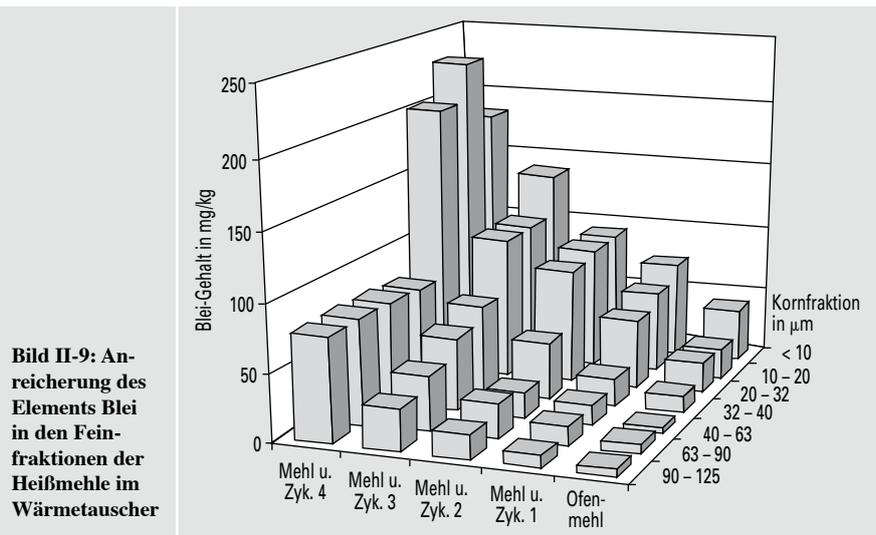
Das hoch flüchtige Element Quecksilber reagiert zu Verbindungen, die im Bereich des Ofens und des Vorwärmers nicht abgeschieden oder zurückgehalten werden. Somit ist Quecksilber nicht im Klinker zu erwarten; eine Vielzahl von Analysen bestätigen dies. Dennoch wird vereinzelt Quecksilber in geringen Konzentrationen im Klinker nachgewiesen. Die entsprechende Bindungsform bzw. der Mechanismus der Einbindung in den Klinker ist allerdings noch unbekannt. Ähnlich wie Thallium bildet auch Quecksilber einen äußeren Kreislauf zwischen Vorwärmer, Rohmühle und Staubfilter aus. Zur Reduzierung von Quecksilberemissionen ist eine Absenkung der Gastemperatur vor dem Filter in Verbindung mit der teilweisen Ausschleusung des abgeschiedenen Rohmehls die wirksamste Maßnahme.

Zur Auswahl geeigneter Sekundärbrennstoffe und zur Abschätzung der maximal möglichen Einsatzmengen kann ein im Forschungsinstitut der Zementindustrie entwickeltes verfahrenstechnisches Simulationsmodell genutzt werden. Ebenso kann der Betrieb eines Teilgasabzugs am Ofeneinlauf zur Begrenzung von Chlorkreisläufen zwischen Ofen und Vorwärmer mit diesem Programm berechnet und optimiert werden. In einer Praxis-Anwendung konnten erstmals mit Hilfe des Simulationsprogramms die Auswirkungen erhöhter Einträge von Chlor, Schwefel

und Alkalien über verschiedene Sekundärbrennstoffe auf die Prozesstemperaturen und die Anreicherungen im Heißmehl erfolgreich abgeschätzt werden. Ebenso konnte der kreislaufreduzierende Effekt eines Bypassgasabzugs quantitativ bestimmt werden. Die relevanten Chlor-, Schwefel- und Alkalikreisläufe können demnach gut abgebildet werden.

Derzeit wird das Modell um das Verhalten der Spurenelemente erweitert, um zukünftig auch für diese Stoffe deutlich genauere und praxisnähere Stoffflussberechnungen zu ermöglichen. Das Verhalten der Spurenelemente im Klinkerbrennprozess wird dabei entsprechend ihren Flüchtigkeiten sowie entsprechend den Einbinde- und Abscheidegraden in den verschiedenen Anlagenteilen abgebildet. Die relevanten Prozessparameter sind neben den Gas- und Materialtemperaturen insbesondere auch die Staubabscheidegrade der Zyklonstufen, das Angebot an kondensationsfördernden, oberflächenreichen Feinfraktionen im Mehl und im Staub sowie die Ausprägung der Chlor-, Schwefel- und Alkalikreisläufe. Um hierzu die für die Modellierung notwendigen Daten zu gewinnen, fanden Untersuchungen im Technikum und den Labors des Forschungsinstituts sowie Betriebsuntersuchungen an drei Ofenanlagen statt.

Zunächst wurden die zur Beurteilung des Anlagenbetriebs und die zur genauen Bilanzierung der äußeren und inneren Stoffkreisläufe notwendigen Messungen durchgeführt. Dies beinhaltete die Probenahme der ein- und austretenden Stoffe, die Bestimmung von Volumen- und Massenströmen sowie Gasanalysen und Temperaturmessungen. Darüber hinaus wurden die Anlagenteile des äußeren Kreislaufs Verdampfungskühler, Rohmahlanlage und Staubfilter gesondert hinsichtlich der Spurenelemente bilanziert. Umfangreiche Probenahmen von Prozessmehlen und -stäuben wurden, ebenso wie Gasanalysen, auch im Wärmetauscher durchgeführt. In den Zyklonsteigrohren wurden zum einen die Stäube durch Absaugung beprobt. Die Abscheidung fand in einem Probenahme-Zyklon statt, so dass sich im Gegensatz zu den oft verwendeten Gewebe- oder Hülsenfiltern kein Filterkuchen aufbauen konnte. Diese Messmethode verhinderte eine Kondensation von eigentlich filtergängigen Gasbestandteilen auf dem Filterkuchen und ermöglichte es, Staubproben mit unverfälschten Gehalten an Spurenelementen zu erhalten. Zum anderen wurden die Staubgehalte in den Zyklonsteigrohren gemessen, um somit die Staub- und Mehlmassenströme im Vorwärmer berech-



nen zu können. Hierzu war eine Modifizierung der Messeinrichtung zur Bestimmung der Rohgasstaubgehalte durch eine luftgekühlte Sonde und hochtemperaturbeständige Filtermaterialien notwendig.

Bei der Betrachtung der Gehalte in den Mehlen und Stäuben bestätigten die durchgeführten Bilanzmessungen das bekannte Verhalten von Spurenelementen im Klinkerbrennprozess. Ein Vergleich zwischen einer Anlage mit Bypass und entsprechend niedrigen Chlorkreisläufen und einer zweiten Anlage ohne Teilgasabzug und mit ausgeprägtem Chlorkreislauf zeigt, dass die Flüchtigkeit und damit die Kreislaufbildung der Spurenelemente durch die Anwesenheit von Chlor erhöht wird. Für die schwer flüchtigen Elemente Blei und Cadmium konnten bei erhöhtem Chloridangebot Anreicherungen in den Heißmehlen der unteren Zyklonstufen und eine Verminderung der Einbindung in den Klinker festgestellt werden (Bild II-7). Diese Elemente wurden ebenfalls im Heißbereich des Vorwärmers in der Gasphase nachgewiesen.

Um den Einfluss der Feinheiten von Mehlen und Stäuben auf die Kondensation und Anreicherung von Spurenelementen zu untersuchen, wurden die Korngrößenverteilungen der Mehl- und Staubproben ermittelt. Es zeigte sich, dass die Mehle beim Durchlaufen des Zyklonvorwärmers vom Ofenmehl hin zum Heißmehl deutlich gröber werden. Einige der Proben wurden mittels Trocken- und Nasssiebung in Fraktionen zerlegt und auf Spurenelemente untersucht. Die Güte der Siebfractionierung wurde durch rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen (ESEM, Bild II-8) untersucht und belegt. Für die Elemente Thallium, Cadmium und Blei konnten in den Feinanteilen der Heißmehle im Wärmetauscher Anreicherungen nachgewiesen werden (Bild II-9). Bei den nicht flüchtigen Elementen wie Arsen, Nickel, Chrom, Kobalt, Mangan und Vanadium wurden wie erwartet keine Anreicherungen in den feinen Kornfraktionen gefunden (Bild II-10).

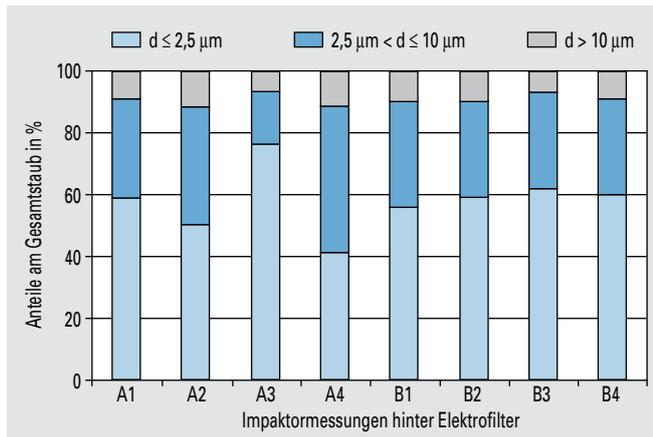


Bild II-11: Messungen im Reingas der Anlagen A und B nach Elektrofilter mit dem Johnas II-Impaktor. Der Grenzpartikeldurchmesser d beschreibt den aerodynamischen Durchmesser d_{ae} einer äquivalenten Kugel mit gleichen physikalischen Eigenschaften.

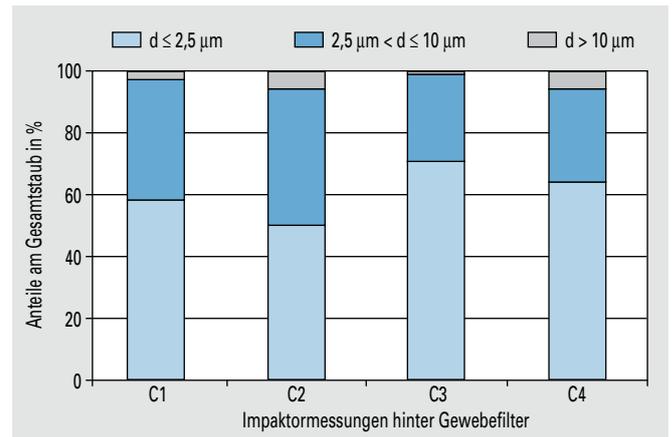


Bild II-12: Messungen im Reingas der Anlage C nach Gewebefilter mit dem Johnas II-Impaktor. Der Grenzpartikeldurchmesser d beschreibt den aerodynamischen Durchmesser d_{ae} einer äquivalenten Kugel mit gleichen physikalischen Eigenschaften.

Um den Bereich der Partikel mit Durchmessern von weniger als $15 \mu\text{m}$ noch detaillierter zu betrachten, wurden die im Vorwärmer entnommenen Prozessmehle in einer Technikanlage des Forschungsinstituts mittels eines Kaskadenimpaktors weiter geteilt und fraktioniert. Die Ergebnisse der Spurenanalyse der erzeugten Fraktionen waren jedoch trotz des erheblichen experimentellen Aufwands nicht eindeutig. Insbesondere aufgrund der geringen Beladung der Impaktorstufen ließen sich bei einigen Messungen nicht alle Spurenelemente auf den Impaktorstufen nachweisen, so dass Aussagen zu Anreicherungseffekten innerhalb des Feinbereichs erschwert wurden.

Weiterhin fanden direkte fraktionierende Staubmessungen in den Reingasen der Ofenanlagen mit anschließender Spurenanalyse statt. In den Reingasstäuben konnten Auffälligkeiten weder für die nicht flüchtigen noch für die flüchtigen Elemente festgestellt werden.

PM 10

Feinstäube mit einem Partikeldurchmesser von weniger als 10 Mikrometer (PM 10) sind nach Einschätzung der Weltgesundheitsorganisation WHO für Gesundheitsschäden verantwortlich. Daher wurde von der Europäischen Union für diese Feinstäube ein Immissionsgrenzwert (Jahresmittelwert) von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ festgelegt. Außerdem darf der Tagesmittelwert nicht häufiger als 35 mal pro Jahr $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ überschreiten. Beide Grenzwerte wurden mit der novelierten TA Luft, die am 1. Oktober 2002 in Kraft getreten ist, in deutsches Recht überführt.

Eine wesentliche Quelle für Feinstaubimmissionen in Ballungsgebieten ist der

Straßenverkehr. Dies wird nicht zuletzt durch die aktuellen Diskussionen zu Luftreinhalteplänen in verschiedenen europäischen Großstädten deutlich. Dagegen sind die Staubemissionen aus den Ofen- und Mahlanlagen der Zementindustrie so gering, dass sie in der Umgebung der Zementwerke praktisch keine Relevanz haben. In den vergangenen Jahren sind sie wegen ihrer Feinstaubanteile dennoch wieder in die Diskussion gekommen. Unabhängig davon, ob die Gesamtmissionsbelastung mit Hilfe weiterer Emissionsminderungen bei Industrieanlagen überhaupt reduziert werden kann, stellt sich somit die Frage nach den PM-10-Emissionen von Produktionsanlagen der Zementindustrie. Vom Forschungsinstitut wurden daher aktuell die Feinstaubkonzentrationen in Reingasen an mehreren Drehofenanlagen gemessen. Die Messungen fanden hinter Elektrofiltern und erstmals auch hinter einem Gewebefilter statt. Die Feinstaubkonzentration bzw. die Korngrößenverteilung von emittierten Stäuben wird mit Hilfe von Impaktoren bestimmt. Bei den Messungen wurde der 3-stufige Impaktor Johnas II eingesetzt. Die fraktionierenden Messungen wurden parallel durch Bestimmungen der Gesamtstaubkonzentrationen begleitet.

In Bild II-11 sind die Korngrößenanteile der emittierten Stäube $< 2,5 \mu\text{m}$, $2,5$ bis $10 \mu\text{m}$ und $> 10 \mu\text{m}$ von den Drehofenanlagen A und B dargestellt. In beiden Anlagen werden Elektrofilter zur Entstaubung der Rohgase eingesetzt. Während die Ergebnisse für Anlage B für alle 4 Messungen ein sehr gleichmäßiges Bild zeichnen, kommt es in Anlage A zu größeren Schwankungen. Dies betrifft die Aufteilung zwischen den Fraktionen $< 2,5 \mu\text{m}$ und $2,5$ bis $10 \mu\text{m}$. Im Durchschnitt kann der Anteil $< 10 \mu\text{m}$ mit 90 M.-% angegeben werden. Die Fraktion

$< 2,5 \mu\text{m}$ umfasst dabei etwa 60 M.-%. Diese Ergebnisse liegen im Rahmen der bereits zuvor durchgeführten Feinstaubmessungen, bei denen PM-10-Anteile von 80 bis 95 % und PM-2,5-Anteile von 30 bis 70 % ermittelt wurden.

Um zu untersuchen, ob sich die Aufteilung der Partikel hinter einem Gewebefilter zur Entstaubung des Rohgases grundsätzlich anders darstellt, fand eine weitere Impaktormessung im Reingas der Anlage C hinter Gewebefilter statt (Bild II-12). Die Messung war zeitlich sehr aufwendig, da die Gesamtstaubbelastung des Reingases nur wenige mg/m^3 betrug. Somit waren lange Absaugzeiten notwendig, um alle 3 Filter des Impaktors ausreichend mit Staub zu belegen. Die Ergebnisse sind relativ gleichmäßig und zeigen, ebenso wie hinter Elektrofiltern, einen Anteil von etwa 60 % PM 2,5. Auch der PM-10-Anteil von um 95 % liegt im Bereich der Messergebnisse hinter den Elektrofiltern. Da dies jedoch die bisher einzige Untersuchung hinter einem einzelnen Gewebefilter ist, können die Ergebnisse noch nicht verallgemeinert werden.

Relevanz von Quarz in der Emission von Drehofenanlagen

Kristallines Siliziumdioxid besteht aus verschiedenen mineralischen Modifikationen; die häufigste ist Quarz. Seit einiger Zeit wird die Krebs erzeugende Wirkung quarzhaltiger Feinstäube diskutiert. Als Feinstaub wird die aveolengängige Stauffraktion mit einer Partikelgröße kleiner PM 4 angesehen. Dabei handelt es sich um Teilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser von $4 \mu\text{m}$, die in einem geeigneten Abscheidesystem zu 50 % abgetrennt werden können.

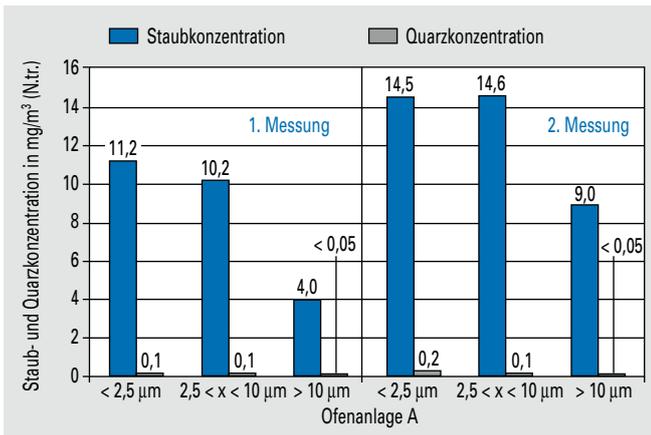


Bild II-13: Staub- und Quarzkonzentration in Abhängigkeit von der Partikelgröße im Abgas der Drehofenanlage A (2 Messungen)

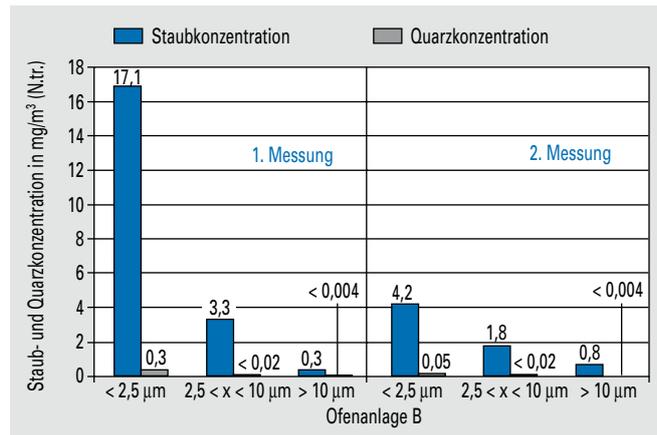


Bild II-14: Staub- und Quarzkonzentration in Abhängigkeit von der Partikelgröße im Abgas der Drehofenanlage B (2 Messungen)

Am 7. Mai 2002 erfolgte durch den Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) ein Beschluss, wonach kristallines Siliciumdioxid in Form von Quarz und Cristobalit als beim Menschen Krebs erzeugend anzusehen ist. Diese Einstufung des AGS hat dazu geführt, dass jetzt ein Emissionsgrenzwert für Quarzfeinstaub in der Diskussion steht. Da Quarzfeinstaub in der Stoffliste der TA Luft Nr. 5.2.7.1.1 der Krebs erzeugenden Stoffe nicht genannt ist, muss eine Einstufung unter Berücksichtigung des Krebsrisikos erfolgen. Stand der aktuellen Diskussion ist es, Quarzfeinstaub der Klasse III der Krebs erzeugenden Stoffe nach TA Luft zuzuordnen. Danach ergäbe sich ein Emissionswert von 1 mg/m^3 für kristallinen Quarzfeinstaub (PM 4). Da es sich hierbei um einen Summenwert handelt, darf dieser auch bei Auftreten mehrerer Stoffe aus einer Klasse diesen Wert nicht überschreiten.

Während die Bestimmung von Quarzfeinstaub im Bereich des Arbeitsschutzes seit Jahren praktiziert wird, stellt die Messung der Quarzfeinstaubkonzentration in der Emission von Anlagen Neuland dar. Probleme bestehen sowohl hinsichtlich der selektiven Abscheidung der PM 4-Fraktion als auch in der Analytik des kristallinen SiO_2 -Anteils. Mit der VDI 2066 Blatt 10 existiert ein standardisiertes Verfahren zur Messung der Emissionskonzentration von PM 2,5 und PM 10 (Johnas-Impaktor). Hinsichtlich der Probenahme von PM 4 bei Emissionsmessungen befindet sich derzeit ein modifizierter Johnas-Impaktor in der Entwicklung.

Besondere Anforderungen sind an die bei der Probenahme zu verwendenden Filtermaterialien zu stellen. Die sonst üblicherweise eingesetzten Quarzfilter sind in

diesem Fall ungeeignet, weil bei der Analyse nicht zwischen dem amorphen Filtermaterial und dem kristallinen Quarzstaub unterschieden werden kann. Alternativen stellen Cellulosenitrat- oder Celluloseacetatfilter sowie Metallvliese dar. Je nach Einsatzfall sind Filter aus Cellulosenitrat (bis 100°C) bzw. Filter aus Celluloseacetat (bis 180°C) nicht genügend temperaturbeständig. Metallvliese können zwar im Hochtemperaturbereich eingesetzt werden, vor der Analyse muss allerdings die gesamte Staubprobe auf ein anderes Trägermedium überführt werden. Als Analysenverfahren werden die Infrarotspektroskopie (FTIR) und die Röntgendiffraktometrie eingesetzt, die sich bereits bei Arbeitsplatzuntersuchungen bewährt haben.

Um erste Kenntnisse über die Relevanz von Quarzfeinstaubemissionen für Drehofenanlagen der Zementindustrie zu erhalten, wurden vom Forschungsinstitut der Zementindustrie bislang Messungen an 2 Drehofenanlagen durchgeführt. Dazu wurde der Johnas-Impaktor eingesetzt und mit Celluloseacetat als Filtermaterial bestückt. Wie bereits oben erläutert, konnten aufgrund der noch nicht vorhandenen Messtechnik für PM 4 lediglich die Fraktionen PM 10 und PM 2,5 gemessen werden.

Die hier beschriebene Variation des Probenahmeverfahrens in Kombination mit der daran anschließenden Analyse des Quarzanteils stellt in dieser Form eine Eigenentwicklung des Forschungsinstituts der Zementindustrie dar. Ziel war es zunächst, erste Informationen zur Quarzemission von Drehofenanlagen der Zementindustrie zu erhalten. Zur Ermittlung der Messunsicherheit des Verfahrens stehen abschließende Untersuchungen noch aus.

In den Bildern II-13 und II-14 sind die an den beiden Drehofenanlagen gemessenen Staub- und Quarzkonzentrationen dargestellt. Es wurden jeweils 2 Messungen durchgeführt. Die Gesamtstaubemission sowie die Gesamtquarzemission ergibt sich als Summenwert aus den 3 Einzelwerten. Ofenanlage A wies vergleichsweise hohe Staubemissionen auf. Die damit verbundene Gesamtquarzemission lag bei $0,25$ bzw. $0,35 \text{ mg/m}^3$. An der Ofenanlage B waren die Staubemissionen geringer. Nur in der Fraktion $< 2,5 \mu\text{m}$ konnte Quarz nachgewiesen werden. Die Werte lagen bei $0,3$ bzw. $0,05 \text{ mg/m}^3$ Quarz.

Der aktuell diskutierte Emissionsgrenzwert von 1 mg/m^3 wird an diesen beiden Anlagen unterschritten. Je nach Lagerstätte oder Rohmehlzusammensetzung sind gewisse Schwankungsbreiten wahrscheinlich. Das Forschungsinstitut der Zementindustrie wird daher weitere Messungen an anderen Drehofenanlagen durchführen und die weitere Entwicklung der Messtechnik im Hinblick auf Quarzfeinstaubemissionen verfolgen.

SNCR-Verfahren ist Stand der Technik

Das SNCR-Verfahren (selektive nicht-katalytische Reduktion) wird seit über 25 Jahren zur NO_x -Minderung an industriellen Feuerungsanlagen eingesetzt. Stickstoffoxide (NO_x) werden dabei durch Eindüsung eines Reduktionsmittels, meistens Ammoniak, zu N_2 und H_2O reduziert. In der deutschen Zementindustrie liegen mittlerweile umfangreiche Betriebserfahrungen zur Anwendung des SNCR-Verfahrens vor. An über 30 Ofenanlagen in Deutschland wird diese Sekundärmaßnahme zur NO_x -Minderung angewendet – sowohl an Drehofenanlagen mit Zyklonvorwärmer als auch an

Drehofenanlagen mit Rostvorwärmer und an Anlagen mit gestufter Zweitfeuerung im Calcinator. Auch in anderen europäischen Ländern wird das SNCR-Verfahren zunehmend zur NO_x -Minderung an Zementofenanlagen eingesetzt.

Vor der Anwendung des SNCR-Verfahrens ist es ratsam, durch verschiedene Primärmaßnahmen oder durch die Wahl der Brennstoffe das NO_x -Ausgangsniveau so weit wie möglich abzusenken. Wird dann zusätzlich das SNCR-Verfahren als Sekundärmaßnahme eingesetzt, so lassen sich bereits mit einer unterstöchiometrischen Eindüsung des Reduktionsmittels gute Minderungserfolge erreichen.

Die Leistungsfähigkeit des SNCR-Verfahrens kann durch die NO_x -Minderungsrate sowie den auftretenden NH_3 -Schlupf bemessen werden. Zur Erreichung hoher Minderungsraten ist in der Regel eine überstöchiometrische Eindüsung des Reduktionsmittels erforderlich, d. h. das NH_3/NO -Molverhältnis ist $> 1,0$. Dabei kann es zu Emissionen von nicht umgesetztem NH_3 kommen, dem so genannten NH_3 -Schlupf. Insbesondere im Direktbetrieb (d. h. ohne Mahltrocknung) können die NH_3 -Emissionen ansteigen. Im Verbundbetrieb resultieren zumeist deutlich geringere NH_3 -Emissionskonzentrationen, da in diesem Fall ein erheblicher Teil des im Rohgas enthaltenen Ammoniaks am Rohmehl abgeschieden wird. Da der Anteil der Direktbetriebsphasen zumeist gering ist, bleiben auch die NH_3 -Emissionen im längerfristigen Mittel gering.

Wird das nicht umgesetzte Ammoniak am Rohmehl und den EGR-Stäuben angereichert, so kann es zum Aufbau eines äußeren Kreislaufs kommen. Im Direktbetrieb wird dieser Kreislauf entlastet und es kann ebenfalls zu einem Anstieg der NH_3 -Emissionskonzentrationen kommen. Werden Filterstäube ausgeschleust und der Zementmahlung zugegeben, so ist aus Gründen der Produktqualität der Ammoniumgehalt der Stäube zu beachten. Die langjährigen Erfahrungen an vielen Ofenanlagen haben aber gezeigt, dass die Produktqualität durch das SNCR-Verfahren nicht beeinträchtigt wird.

Ziel von Optimierungsversuchen ist es, die NH_3 -Ausbeute zu verbessern. Für eine möglichst hohe Umsetzung mit den Stickstoffoxiden sind u. a. die Temperatur, die Verweilzeit der Reaktanten im Temperaturfenster und die Einmischung des Reduktionsmittels (Tröpfchengröße, Wurfweite, Abdeckung der Eindüseebene[n], Mess-

und Regeltechnik) von entscheidender Bedeutung. Auch die Art des Reduktionsmittels hat einen Einfluss auf die Abbaureaktionen.

Als Standard-Reduktionsmittel gilt nach wie vor 25%ige Ammoniak-Lösung („Ammoniakwasser“). In vielen Fällen werden aber auch so genannte „Fotowässer“ (d. h. aufbereitete Entwickler- und Fixierlösungen aus dem fotografischen Prozess) als Reduktionsmittel verwendet. Die Gesamt-N-Gehalte (NH_4^+ und evtl. Harnstoff) liegen meist im Bereich von 1,5 bis 5%, doch trotz dieser geringen Konzentration werden zum Teil gute bis sehr gute Minderungserfolge erzielt. Das Reduktionsmittel Harnstoff (als Lösung oder in Form von Prills) spielt in der Zementindustrie nur eine untergeordnete Rolle.

Für den Fall besonders hoher NO_x -Minderungsraten mit nur geringem NH_3 -Schlupf wird in der Literatur der Begriff „High efficiency SNCR“ verwendet. Bei der Optimierung von SNCR-Anlagen wird oft eine sehr niedrige NO_x -Konzentration, bis herunter zu 200 mg/m^3 , als Zielwert angestrebt. In Betriebsversuchen ist es teilweise sogar gelungen, kurzzeitig ein so niedriges Niveau zu erreichen. Allerdings waren dann häufig erhöhte NH_3 -Emissionen festzustellen.

Aus Sicht des Umweltschutzes ist das Augenmerk nicht nur auf den NO -Abbau, sondern auch auf die NH_3 -Emissionen zu legen. So ist es ein Ziel der internationalen Umweltpolitik, die Einträge von Ammoniak und Ammonium in die Umwelt zu begrenzen. In dem so genannten Göteborg-Protokoll und in der Europäischen Richtlinie 2001/81/EG (Nationale Emissionshöchstmengen für bestimmte Luftschadstoffe) wurden diese Forderungen dokumentiert. Relativierend muss dazu allerdings erwähnt werden, dass der Anteil der Industrie an den gesamten Ammoniakemissionen sehr gering ist und bei ca. 1 bis 2% liegt. Da die Zementindustrie wiederum nur einen kleinen Anteil zu den industriellen NH_3 -Emissionen beiträgt, kann diese Fracht insgesamt als irrelevant angesehen werden.

Im Sinne einer ganzheitlichen Bewertung des Verfahrens unter Berücksichtigung aller Umweltaspekte und auch der Wirtschaftlichkeit kann es sinnvoll sein, mit dem SNCR-Verfahren keine maximale NO_x -Minderung anzustreben, sondern eine möglicherweise etwas geringere Minderungsraten bei dann nur noch geringem NH_3 -Schlupf. Diese Vorgehensweise wird

mittlerweile auch von Behördenvertretern anerkannt. Unter diesen Randbedingungen kann das SNCR-Verfahren als effektivste NO_x -Minderungsmaßnahme für die Zementindustrie angesehen werden. Aufgrund der langjährigen und breiten Betriebserfahrungen in der Zementindustrie gilt das SNCR-Verfahren als „Stand der Technik“ oder als „Beste Verfügbare Technik“ (engl.: BAT). Die spezifischen Kosten des SNCR-Verfahrens (Investitions- und Betriebskosten) liegen nach neueren Schätzungen zwischen 0,50 und 0,70 €/t Klinker.

Gestufte Verbrennungsführung im Calcinator

Neue Drehofenanlagen der Zementindustrie werden heute durchweg mit Vorcalciniertechnik ausgerüstet. Die Betriebserfahrungen zeigen, dass durch Anwendung dieser Technologie eine wirkungsvolle NO_x -Minderung zu erreichen ist. Obwohl dieses Verfahren seit vielen Jahren angewendet wird, bestehen über die Zusammenhänge zwischen der NO -Entstehung und dem NO -Abbau im Calcinator noch immer Wissenslücken, die eine optimierte Betriebsweise im Hinblick auf NO_x , Sekundärbrennstoffeinsatz und Ofenbetrieb erschweren.

Die wesentlichen Einflussgrößen für die NO_x -Minderung durch gestufte Feuerführung sind:

- die Luftzahl in der Reduktions- und Ausbrandzone,
- die Brennstoffeigenschaften,
- die Temperatur in der Reduktions- und der Ausbrandzone,
- die NO_x -Beladung aus der ersten Stufe (Sinterzone) vor Eintritt in die Reduktionszone,
- die Gasverweilzeit in der Reduktions- und der Ausbrandzone und
- die Mischung der Gas- bzw. Feststoffströme.

Schon die Anzahl dieser bedeutsamen Einflussgrößen gibt einen Hinweis darauf, dass die chemisch-physikalischen Vorgänge, die zur NO_x -Bildung bzw. -Minderung im Calcinator führen, sehr komplex sind. Die wesentlichen technischen Maßnahmen sind Brennstoff- bzw. Luftstufung zur Beeinflussung der lokalen Luftzahl, Mehlstufung zur Beeinflussung der Temperaturverteilung sowie Auswahl und Aufbereitung der Brennstoffe zur Beeinflussung der Reaktionskinetik.

Optimierung der Luftzahl in der Reduktionszone

Die Luftzahl, die das Verhältnis zwischen der tatsächlich vorhandenen Luftmenge und der zur vollständigen Verwertung des Brennstoffs benötigten Menge angibt, kann sowohl durch die Art und Menge des Brennstoffs als auch durch die Aufteilung der Luft und des Brennstoffs beeinflusst werden. Aus der Literatur ist bekannt, dass sich für die Luftzahl in der Reduktionszone ein Optimum finden lässt, an dem eine maximale NO_x -Minderung erreicht werden kann. Die Lage dieses Optimums ist wiederum abhängig vom Brennstoff, von der Verweilzeit und der Temperatur. Für gasförmige Brennstoffe wird die optimale Luftzahl häufig mit 0,7 bis 0,85 angegeben. Unter oxidierenden Bedingungen (Luftzahl > 1) kommt es zu einer vermehrten NO -Bildung. Bei Luftzahlen deutlich unterhalb von 1 werden hingegen die stickstoffhaltigen Zwischenprodukte (HCN und NH_2) zunächst nur unvollständig umgesetzt. Sie werden dann teilweise in den nachgelagerten Anlagenteilen wieder zu NO oxidiert.

Mehlstufung

Seit langem ist bekannt, dass der NO -Abbau in der Reduktionszone einer gestuften Feuerung durch hohe Temperaturen begünstigt wird. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Geschwindigkeiten der NO -Abbaureaktionen mit steigender Temperatur zunehmen. Technisch lässt sich die Temperatur in der Reduktionszone eines Calcinator durch Stufung der Mehlzuführung beeinflussen. **Bild II-15** zeigt die Auswirkungen der Mehlstufung auf die NO -Bildung in einem Calcinator der Firma Krupp Polysius. Beim Versuch ohne Mehlstufung wurde das gesamte Mehl aus der zweituntersten Zyklonstufe im unteren Bereich des Calcinator zugegeben. Dabei stellte sich eine Temperatur von 870°C in der Reduktionszone ein. Als Calcinator-Brennstoff wurde Braunkohle eingesetzt. Insgesamt wurde bei dieser Einstellung im Calcinator mehr NO_x abgebaut als neu gebildet. Bei dem Versuch mit Mehlstufung wurde etwa die Hälfte des Mehls im oberen Bereich des Calcinator zugegeben. Dadurch stieg die Temperatur in der Reduktionszone auf bis zu 1170°C an. Aus dem Bild wird deutlich, dass dies zu einem deutlich effektiveren NO_x -Abbau führte. Interessant ist, dass auch der CO -Abbau aufgrund der höheren Temperaturen in der Ausbrandzone beschleunigt wurde. Auf diese Weise konnten gleichzeitig eine deutlich niedrigere NO_x -Emission und eine etwas geringere CO -Emission erzielt werden.

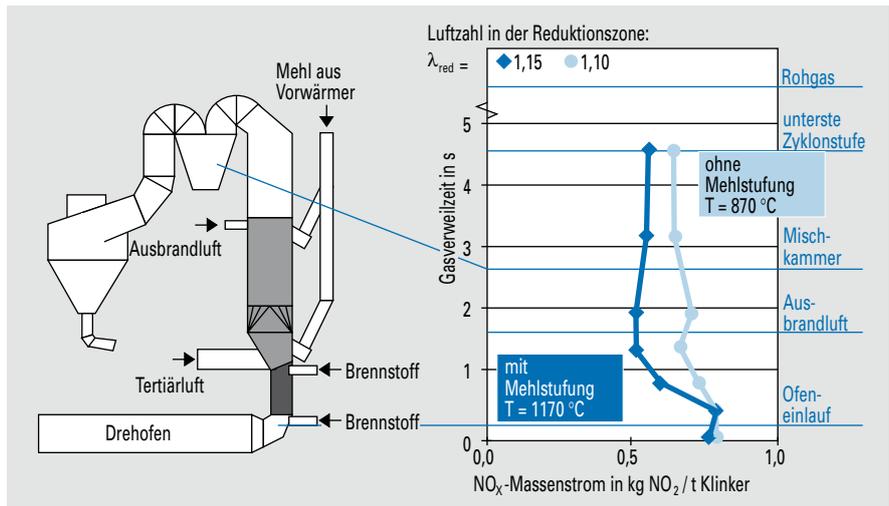


Bild II-15: Auswirkung der Mehlstufung auf die NO -Bildung im Calcinator

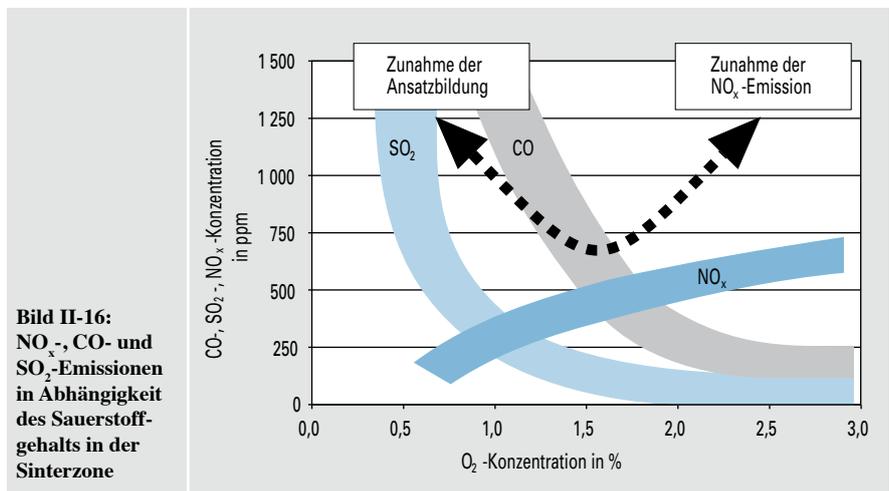


Bild II-16: NO_x -, CO - und SO_2 -Emissionen in Abhängigkeit des Sauerstoffgehalts in der Sinterzone

Grenzen der NO_x -Minderung durch gestufte Verbrennung

Die durchgeführten Betriebsversuche haben zudem gezeigt, dass die Betriebsweise des Vorcalcinerofens im Hinblick auf eine minimale NO_x -Emission optimiert werden kann. Es konnten zum Teil sehr niedrige NO_x -Emissionen erzielt werden. Andererseits ließen sich diese extremen Einstellungen häufig nicht über einen längeren Zeitraum fahren, da sich betriebstechnische Probleme einstellten. Betriebsverstellungen, wie z. B. eine extreme Luftstufung, haben direkte Auswirkungen auf die Luftverteilung im Ofensystem und damit auf die Verbrennungsbedingungen sowohl in der Drehofenfeuerung als auch im Calcinator.

Auch den Möglichkeiten, durch Mehlstufung die Lage der Temperaturzonen und damit die Effizienz der Stickoxidreduk-

tion zu beeinflussen, sind betriebstechnische Grenzen gesetzt. Veränderungen der Mehlaufgabemenge im Calcinator führen zu Änderungen der Druckverhältnisse innerhalb des Systems. Diese Druckverluste beeinflussen dann die Gasströmungen innerhalb der Ofenanlage. Eine Veränderung der Luftverteilung im Ofensystem wirkt sich weiterhin direkt auf die Verbrennungsbedingungen und damit auf die NO -Bildung im Drehrohr aus. Je mehr Brennstoff auf den Ofenstrang gegeben wird, desto niedriger ist der Sauerstoffgehalt im Ofeneinlauf. Dies wiederum wirkt sich mindernd auf die NO -Bildung in der Drehofenfeuerung aus.

Andererseits birgt ein verringertes Sauerstoffangebot in der Sinterzone die Gefahr von nicht optimierten Verbrennungsbedingungen. **Bild II-16** zeigt den altbekannten Zusammenhang zwischen dem Sauerstoff-

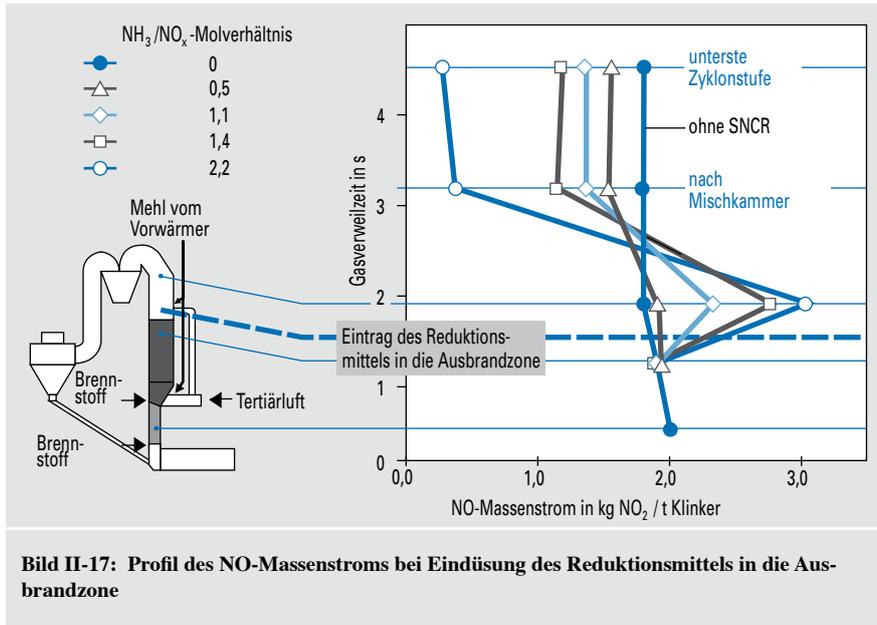


Bild II-17: Profil des NO-Massenstroms bei Eindüsung des Reduktionsmittels in die Ausbrandzone

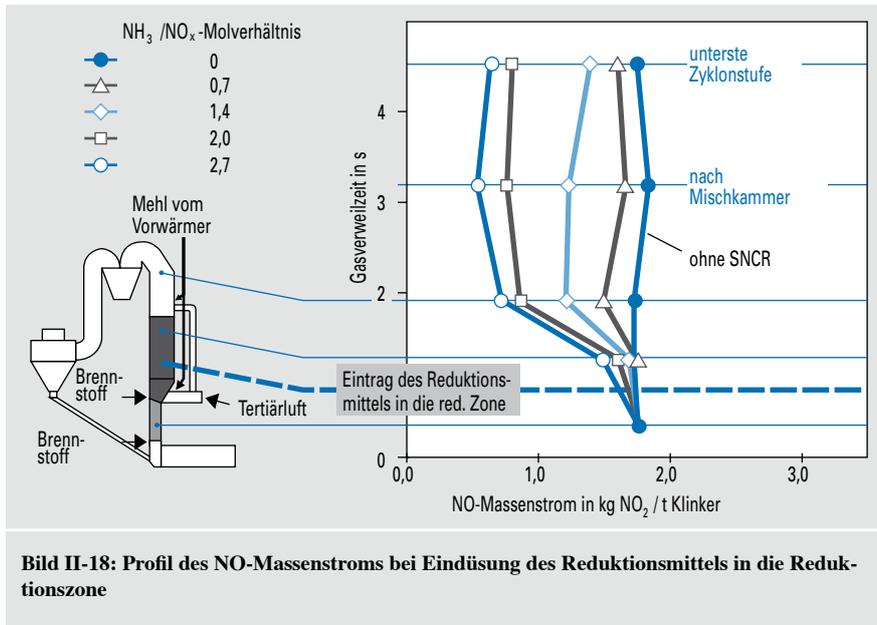


Bild II-18: Profil des NO-Massenstroms bei Eindüsung des Reduktionsmittels in die Reduktionszone

angebot in der Sinterzone sowie der NO_x -Bildung auf der einen und der CO - und SO_2 -Bildung auf der anderen Seite. Während der Betriebsversuche konnten an einigen Drehofenanlagen Betriebseinstellungen mit extremer Luft- bzw. Brennstoffstufung nicht über mehrere Tage gefahren werden, da sich aufgrund der sauerstoffärmeren Fahrweise des Drehofens zunehmend Ansätze im Bereich des Ofeneinlaufs und des Gassteigschachts bildeten.

Beim Einsatz von Sekundärbrennstoffen im Calcinator ist insbesondere darauf zu achten, dass diese möglichst flugfähig sind. Werden grobe Brennstoffpartikel nicht mit dem Gasstrom mitgerissen, fallen sie in den Ofeneinlauf und können dort zu lokal reduzierenden Bedingungen führen. Dies führt

ebenfalls zu einer verminderten Schwefeleinbindung und damit zu verstärkten Schwefelkreisläufen und Ansatzbildung. In diesem Fall hilft es z.B. nicht, hochflüchtige aufbereitete Kunststoffabfälle im Calcinator einzusetzen, wenn diese nicht in der Reduktionszone umgesetzt werden.

Kombination der gestuften Verbrennung mit dem SNCR-Verfahren

Um niedrige NO_x -Emissionen (500 mg/m^3) sicher im Tagesmittel einhalten zu können, kann es erforderlich sein, moderne Voralcalcinieranlagen mit der SNCR-Technik zu kombinieren. Das europäische BAT-Referenzdokument aus dem Jahr 2000 hat die Kombination dieser beiden Verfahren bereits als so genannte „Emerging technique“,

also als „zukünftig möglicherweise einsetzbare Technik“ bezeichnet. Allerdings lagen zu diesem Zeitpunkt nur wenige Kenntnisse über mögliche Wechselwirkungen zwischen diesen beiden Verfahren vor. Beide Verfahren arbeiten in demselben Temperaturbereich ($850\text{-}950 \text{ }^\circ\text{C}$). Während die Stufenverbrennung allerdings eine reduzierende Zone in diesem Bereich erfordert, ist vom SNCR-Verfahren bekannt, dass die Effektivität bei Luftüberschuss höher ist. Ziel der nachfolgend dargestellten FIZ-Untersuchungen war es deshalb, insbesondere den Einfluss des Aufgabortes des Reduktionsmittels und den Einfluss der aufgegebenen Reduktionsmittelmenge auf die NO_x -Minderungsrate und den CO -Ausbrand zu ermitteln.

Die Ergebnisse werden im Folgenden am Beispiel einer Ofenanlage des Typs Polysius veranschaulicht. Als Reduktionsmittel wurden aufbereitete Fotoabwässer mit einer äquivalenten NH_3 -Konzentration von ca. 5% verwendet. Bild II-17 zeigt die Profile des NO -Massenstroms bei Zugabe des Reduktionsmittels in der Ausbrandzone der gestuften Verbrennung bei Einstellung unterschiedlicher Molverhältnisse. Bild II-18 zeigt analog die Verhältnisse bei Zugabe des Reduktionsmittels in die Reduktionszone. Die Verläufe zeigen insbesondere bei höheren Reduktionsmittelmengen deutlich, dass die SNCR-Reaktion inklusive Mischung mehr als 0,5 Sekunden benötigt, um bei Anwendung im Calcinator vollständig abzulaufen. Bei Zugabe in die Ausbrandzone kommt es kurz vor Reduktionsmittelzugabe zu einer erheblichen NO -Bildung, die auf eine Verbrennung des Reduktionsmittels zu NO hindeutet. Diese NO -Zunahme wurde allerdings im Folgenden durch einen sehr intensiven NO -Abbau durch das Reduktionsmittel wieder aufgefangen. Bei Zugabe des Reduktionsmittels in die Reduktionszone hingegen ist keine NO -Zunahme zu erkennen. Der NO -Abbau wiederum fällt im Vergleich zum vorhergehenden Versuch deutlich geringer aus. Ein Grund für diese sehr unterschiedlichen Verläufe dürfte in den ebenfalls sehr unterschiedlichen Turbulenzverhältnissen an den beiden Zugabeorten bestehen. Die Zugabe im oberen Bereich des Calcinators erfolgte gemeinsam mit der Ausbrandluftzugabe, was eine relativ gute Vermischung mit dem Gasstrom erlauben dürfte. Andererseits herrscht hier zunächst eine relativ hohe Sauerstoffkonzentration, die zum Verbrennen eines Teils des Reduktionsmittels beiträgt.

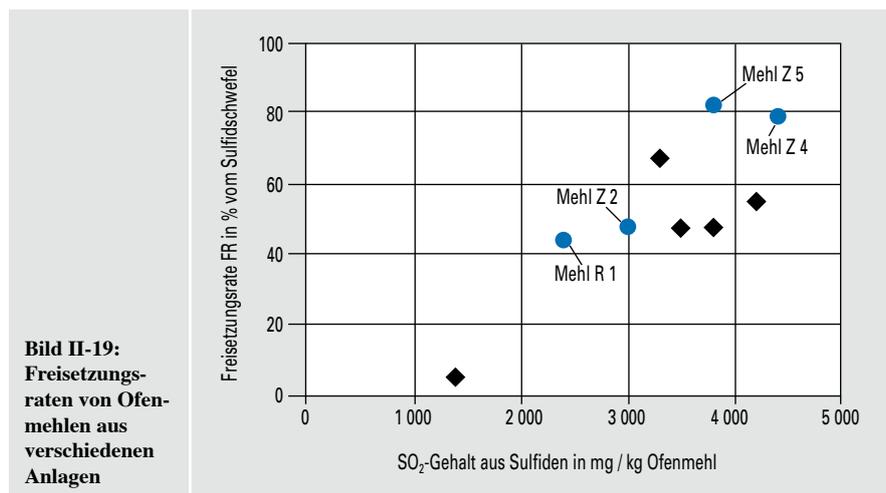
Darüber hinaus wurde anhand der Versuchsergebnisse deutlich, dass ein steigen-

des NH_3/NO -Molverhältnis den ebenfalls im Calcinator ablaufenden CO-Ausbrand behindert. Eine Verzögerung tritt insbesondere bei Zugabe des Reduktionsmittels in die Reduktionszone auf. Der CO-Ausbrand wird offensichtlich stärker gehemmt, wenn die SNCR-Reaktion in der Reduktionszone statt in der Ausbrandzone stattfindet. Diese Verzögerung war noch bis zu ca. 0,5 Sekunden nach Zugabe des Reduktionsmittels zu beobachten. Dies zeigt, wie eng CO- und NO-Abbau miteinander gekoppelt sind. Erst nachdem die SNCR-Reaktion vollständig abgelaufen ist, kann die CO-Oxidation wieder ungehindert ablaufen. Die Verweilzeit von 1,8 bis 2,5 Sekunden zwischen der Reduktionsmittelzugabe und dem Austritt aus der untersten Zyklonstufe – also dem Ende der Verbrennungszone – reichte an dieser Ofenanlage bei den eingestellten Betriebsbedingungen jedoch nicht aus, um die Verzögerung des CO-Ausbrands vollständig aufzufangen. Sie führte daher zu einer Zunahme der CO-Konzentration nach Wärmetauscher.

Zurückzuführen sind diese Wechselwirkungen letztlich auf die Tatsache, dass das SNCR-Verfahren für die Oxidation des NH_3 zu NH_2 (dem eigentlichen Reduktionsmittel für NO) ebenso OH-Radikale benötigt wie die CO-Oxidation. Liegen die OH-Radikale nicht in ausreichendem Überschuss vor, wie das bei dem gegebenen Temperaturniveau der Fall ist, behindern sich die beiden Verfahren gegenseitig. Wichtig ist daher, dass bei der Auslegung neuer Calcinatoren genügend Verweilzeit vorgesehen wird, damit beide Verfahren möglichst unabhängig voneinander angewendet werden können. Dafür ist für das SNCR-Verfahren mindestens eine Sekunde Verweilzeit anzusetzen. Nur so können höhere CO-Emissionen oder auch Ammoniak-schlupf vermieden werden.

Bewertung des SCR-Verfahrens

Die selektive katalytische Reduktion von Stickstoffoxiden (SCR-Verfahren) ist ein Minderungsverfahren, bei dem wie auch beim SNCR-Prozess durch Zugabe von Ammoniak eine Reduktion von Stickstoffoxiden zu NO und H_2O erfolgt. Durch die Gegenwart eines Katalysators wird das Temperaturfenster für die Abbaureaktion in den Bereich zwischen 300 und 400 °C verschoben. Bei Drehofenanlagen der Zementindustrie ist dieses Temperaturfenster im Rohgas nach Wärmetauscher gegeben. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, das staubbeladene Rohgas entweder durch den Katalysator zu leiten („High-Dust-Verfahren“) oder das Abgas zunächst zu entstauben und nach einer Wiederaufheizung



durch den Katalysator zu leiten („Tail-End-Verfahren“).

Während sich das SCR-Verfahren bei Kraftwerken und Müllverbrennungsanlagen seit vielen Jahren bewährt hat, wurde es in der Zementindustrie bislang weltweit erst an einer einzigen Drehofenanlage in Deutschland großtechnisch erprobt (High-Dust-Variante). Das Projekt wurde mit Unterstützung durch das Umweltbundesamt durchgeführt. Bisher wurde die Anlage im Wesentlichen so betrieben, dass eine NO_x -Emissionskonzentration von 500 mg/m^3 eingehalten wurde. Eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse sowie eine Bewertung des Vorhabens durch das Umweltbundesamt steht nach wie vor noch aus. Insbesondere ist nicht klar, wie sich der Katalysator im Dauerbetrieb über viele Jahre bewährt. Ein wesentliches Kriterium zur Bewertung eines Verfahrens im Sinne der IVU-Richtlinie (96/61/EG, Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) stellen die wirtschaftlichen Randbedingungen dar. Aus diesem Grund hat der Arbeitskreis „ NO_x -Minderung“ des VDZ eine aktuelle Kostenkalkulation für sowohl das SCR-Verfahren als auch das SNCR-Verfahren vorgenommen.

Die Berechnungen wurden für 4 unterschiedlich große Ofenanlagen (1 500 / 2 500 / 3 500 / 5 000 t/d) durchgeführt. Danach liegen die spezifischen Kosten (Investitions- und Betriebskosten) im Bereich von 1,0 bis 1,9 € / t Klinker, je nach NO_x -Ausgangsniveau, -Minderungsrate und Ofengröße. Für das SNCR-Verfahren wurden dagegen spezifische Kosten zwischen 0,5 und 0,7 € / t Klinker berechnet (oder weniger, z. B. bei Verwendung von preiswerten Reduktionsmitteln).

Die EU-Kommission hat zu Beginn des Jahres 2005 den Prozess zur Novellierung

der BAT-Merkblätter gestartet. Dabei wird das entsprechende BAT-Merkblatt für die Zement- und Kalkindustrie als eines der ersten überarbeitet werden. Im aktuellen Dokument (Stand Dezember 2001) gab es zur Einstufung des SCR-Verfahrens keine einheitliche Meinung innerhalb des Expertengremiums. Aus diesem Grund ist SCR bisher noch nicht als bestverfügbare Technik im Sinne der europäischen IVU-Richtlinie anzusehen. Es bleibt abzuwarten, zu welchem Ergebnis die nun anstehenden Diskussionen zum SCR-Verfahren im Zusammenhang mit der Novellierung des BAT Reference Dokuments (BREF) führen werden. Tatsache ist allerdings, dass nach gegenwärtigem Kenntnisstand die Kosten für eine SCR-Anlage deutlich über denjenigen für die nicht-katalytische Stickoxidreduktion liegen. Darüber hinaus stehen belastbare Langzeiterfahrungen noch aus.

Rohmaterialbedingte SO₂-Emissionen

Seit vielen Jahren ist bekannt, dass die Emissionen von SO_2 bei Drehöfen der Zementindustrie überwiegend auf anorganische, leicht flüchtige Schwefelverbindungen zurückzuführen sind. Diese werden bei Aufgabe des Ofenmehls auf die Ofenanlage bei Temperaturen um 400 °C unter Bildung von SO_2 zersetzt. Es ist davon auszugehen, dass diese Pyrite und Markasite zunächst vollständig zersetzt werden. Allerdings haben Bilanzuntersuchungen gezeigt, dass unterschiedlich große Anteile des dabei frei werdenden SO_2 noch im Wärmetauscher oder in den nachgeschalteten Anlagen wieder eingebunden werden.

Unter Laborbedingungen können betriebstechnische Parameter ausgeschlossen werden. Bild II-19 fasst die Ergebnisse von Laboruntersuchungen des Forschungsinstituts zur Ausgasung verschiedener technischer

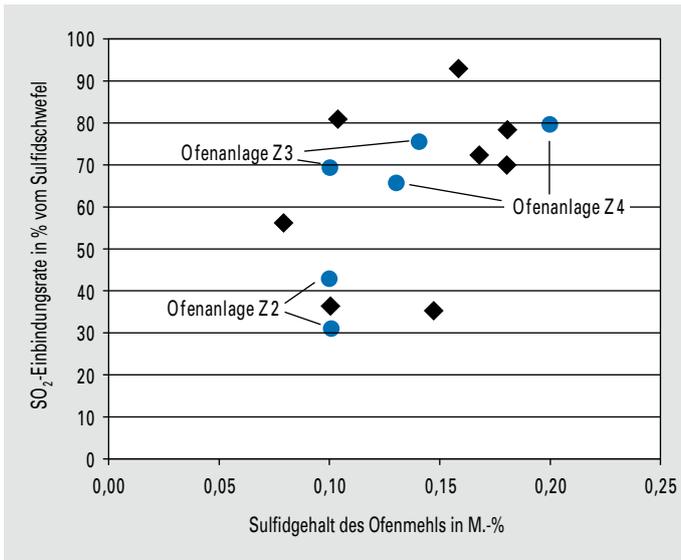


Bild II-20:
Einfluss des Sulfidgehalts im Ofenmehl auf die SO₂-Einbindung

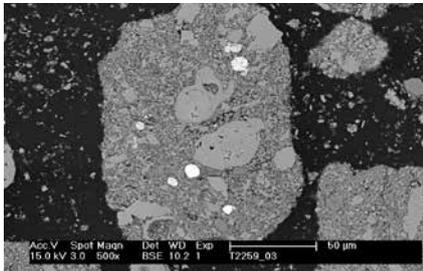
tuts, dass unter praktischen Betriebsbedingungen ein solcher Zusammenhang nicht festgestellt werden kann. Bild II-20 fasst Ergebnisse solcher Bilanzuntersuchungen zusammen. Im Bild sind Ergebnisse von verschiedenen Ofenanlagen dargestellt, in denen Ofenmehle mit unterschiedlich hohen Sulfidgehalten verarbeitet werden. Das Bild zeigt die Einbindungsrate für die verschiedenen Ofenmehle aus unterschiedlichen Anlagen. Es zeigt sich, dass unter den praktischen Betriebsbedingungen zwischen 30 und 90 % des verfügbaren Sulfidschwefels direkt wieder eingebunden werden, entsprechend einer Freisetzungsrate zwischen 10 und 70 %.

Im Folgenden wurde untersucht, inwieweit sich die Ofenmehle in Bezug auf das Vorliegen bzw. die Verteilung der Sulfide unterscheiden. Die Schwefelgehalte der untersuchten Ofenmehle, unterschieden nach der Bindungsform des Schwefels, sind in **Tafel II-5** dargestellt. Aufgrund verschieden hoher Angebote an Reaktionsflächen am Ort der Oxidation der Sulfide ist daher denkbar, dass unterschiedliche Anteile des SO₂ direkt wieder eingebunden werden.

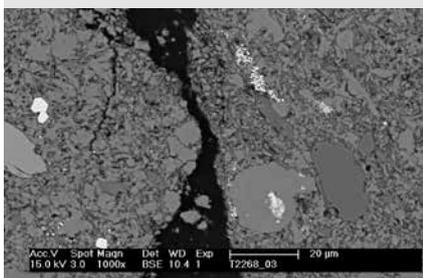
Tafel II-5: Schwefelgehalte der untersuchten Ofenmehle

Schwefelspezies	Einheit	Ofenmehl			
		Z2	Z4	Z5	R1
Sulfat	M.-% SO ₃	0,15	0,23	0,31	0,10
Sulfid		0,38	0,55	0,48	0,30
Sulfit		0,03	0,03	0,04	0,01
Gesamtschwefel		0,56	0,81	0,83	0,41

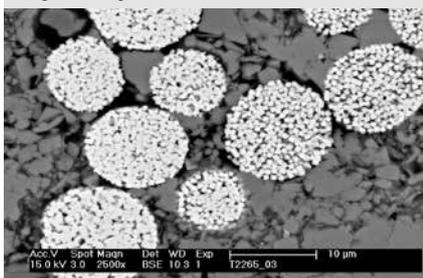
Die **Bilder II-21 bis II-24** zeigen Aufnahmen von Anschliffen der untersuchten Mehle, die mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) aufgenommen wurden. Die Eisensulfide erscheinen aufgrund ihrer gegenüber der Ofenmehlmatrix höheren mittleren Ordnungszahl in diesem Modus als fast weiße Bereiche. Die Bildausschnitte wurden so gewählt, dass die für das jeweilige Mehl typischen Erscheinungsformen der Eisensulfide darin erfasst sind. In Ofenmehl Z2 (Bild II-21) liegen die Sulfide nahezu ausschließlich im Inneren poröser Ofenmehlpartikel vor. Es sind dabei überwiegend rundliche Eisensulfid-Agglomerationen zu erkennen, die einen Durchmesser von bis zu 10 µm aufweisen. Bei höherer Vergrößerung wird deutlich, dass diese Agglomerationen aus einer Vielzahl idiomorph kristallisierter Pyritkriställchen aufgebaut sind. Die Korngröße dieser Kristalle liegt unterhalb von 1 µm. Bei dieser Art des Pyrits handelt es sich um so genannte „verzte Bakterien“.



Vergrößerung: 500fach



Vergrößerung: 1000fach



Vergrößerung: 2500fach

Bild II-21: Verteilung der Sulfide in Ofenmehl Z2

Ofenmehle zusammen (Gasatmosphäre: 30 % CO₂, 2,5 % O₂, Rest N₂). Das Bild zeigt den Anteil des Sulfidschwefels, der als SO₂ hinter einem Laborofen gemessen wird, wenn das Ofenmehl durch die Umgebungstemperatur auf 1000 °C aufgeheizt wird. Im Folgenden wird dieser Anteil mit „Freisetzungsrate“, der nicht ausgegaste bzw. emittierte Anteil mit „Einbindungsrate“ bezeichnet. Aus Bild II-19 geht hervor, dass unter Laborbedingungen durchaus ein Zusammenhang zwischen der Freisetzungsrate von SO₂ und dem Sulfidgehalt des Ofenmehls (hier ausgedrückt als SO₂) zu erkennen ist. Auffallend ist, dass bei keinem der untersuchten Mehle unter den gegebenen Reaktionsbedingungen 100 % des oxidierbaren Sulfidschwefels freigesetzt werden. Die freigesetzte SO₂-Menge der meisten Ofenmehle schwankt zwischen 45 und 80 %. Ein Ofenmehl, das einen vergleichsweise geringen Sulfidschwefelgehalt aufweist, hebt sich von den anderen Mehlen mit einem Anteil von nur 5 % erheblich ab. Die geringe SO₂-Freisetzung aus diesem Mehl könnte ein Hinweis darauf sein, dass ein bestimmter Mindestgehalt an SO₂ direkt durch die anderen Ofenmehlbestandteile, d. h. noch im Partikel, wieder eingebunden wird.

Demgegenüber zeigen Ergebnisse von Bilanzuntersuchungen des Forschungsinsti-

In Bild II-22 sind die REM-Bilder des Ofenmehls Z4 dargestellt. Die Ausbildung der in Ofenmehl Z4 vorliegenden Sulfide ist vergleichbar mit denen des Ofenmehls Z2. Auch hierbei überwiegen die aus kleinen Pyritkristallen aufgebauten rundlichen Agglomerationen. Jedoch treten diese im Gegensatz zu Ofenmehl Z2 vorwiegend in den Randbereichen der Ofenmehlpartikel auf. Zudem sind vereinzelte Partikel zu

erkennen, die ausschließlich Sulfide enthalten und separat im Mehl vorliegen. Die Ofenmehlpartikel sind insgesamt weniger porös als die des Ofenmehls Z2.

In Ofenmehl Z5 (Bild II-23) liegen ebenso wie in den zuvor beschriebenen Ofenmehlen rundliche Agglomerationen kleiner Pyritkristalle vor. Diese sind vorwiegend in Randbereichen der Ofenmehlpartikel enthalten, vereinzelt aber auch im Inneren zu finden. Daneben lassen sich in diesem Ofenmehl größere, kompakte Eisensulfidpartikel erkennen. Diese sind nicht mit anderen Ofenmehlbestandteilen verwachsen und erreichen eine Korngröße von bis zu 15 µm. Auch in diesem Mehl weisen die silicatischen und carbonatischen Ofenmehlpartikel nur eine geringe Porosität auf. Ebenso wie in Ofenmehl Z5 liegen auch die Eisensulfide des Ofenmehls R1 sowohl in Agglomerationen von Pyritkriställchen als auch in größeren kompakten Kristallen vor. Die einzelnen Pyritkriställchen in den Agglomerationen weisen in diesem Mehl größere Abstände als in den anderen Mehlen auf und liegen somit über größere Bereiche der Ofenmehlpartikel verteilt vor (Bild II-24 rechts).

Neben den zuvor beschriebenen Eisensulfiden wurde in den Ofenmehlen Z5 und R1 zusätzlich Strontiumsulfat nachgewiesen (vgl. Bild II-25). Diese Kristalle liegen als grobe Partikel in einer Größe von bis zu ca. 100 µm vor. Die Zersetzung des Strontiumsulfats und somit eine Freisetzung von SO₂ ist im untersuchten Temperaturbereich jedoch nicht zu erwarten, da dieses erst bei Temperaturen oberhalb von 1 200 °C zersetzt wird.

Die vorgestellten Untersuchungen zeigen, dass in der Ausbildung der Eisensulfide im Ofenmehl Unterschiede bestehen. Diese sind einerseits in unterschiedlichen Korngrößenverteilungen der Sulfidpartikel sowie zum anderen in deren Verwachsungsgrad mit den anderen Ofenmehlbestandteilen zu erkennen. Eine direkte Zuordnung der Ergebnisse dieser Untersuchungen zu dem in Bild II-19 dargestellten Zusammenhang zwischen der SO₂-Freisetzungsrate und dem Sulfidgehalt in Rohmehlen ist nicht einfach möglich. Dennoch zeigen die Untersuchungen, dass sowohl die Partikelstruktur selbst (z. B. poröse oder dichte Partikel) als auch das Vorliegen des Sulfids in den Ofenmehlpartikeln sehr unterschiedlich sein können und somit Auswirkungen auf die lokale Konzentration von SO₂ bei der Pyrit-Zersetzung sowie auf die Diffusion des dabei entstehenden SO₂ durch die Ofenmehlpartikel haben.

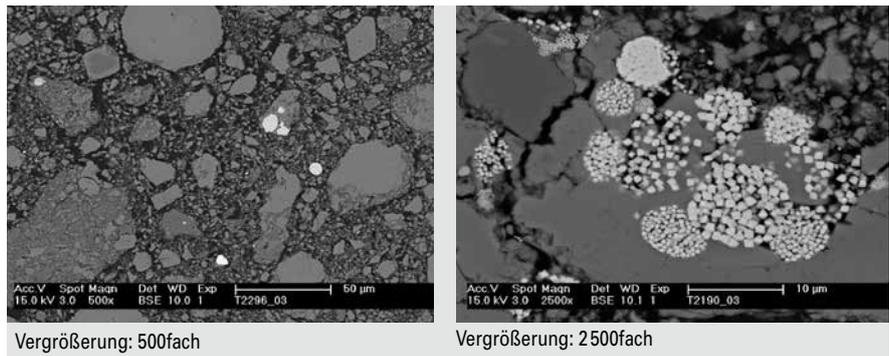


Bild II-22: Verteilung der Sulfide in Ofenmehl Z4

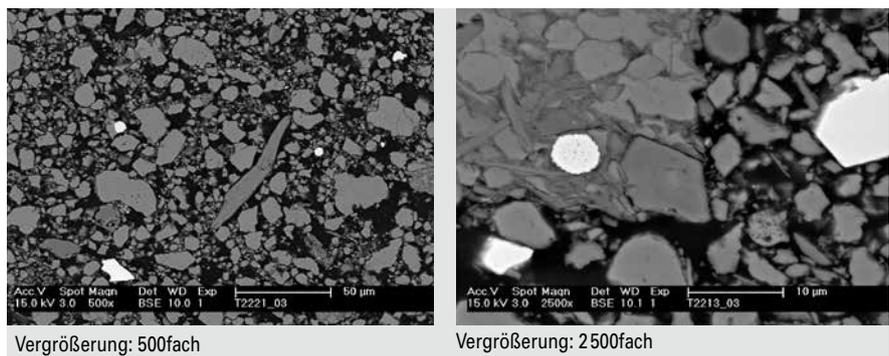


Bild II-23: Verteilung der Sulfide in Ofenmehl Z5

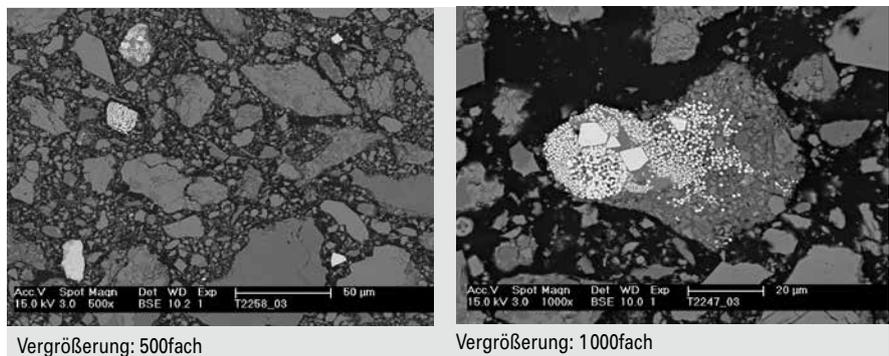


Bild II-24: Verteilung der Sulfide in Ofenmehl R1

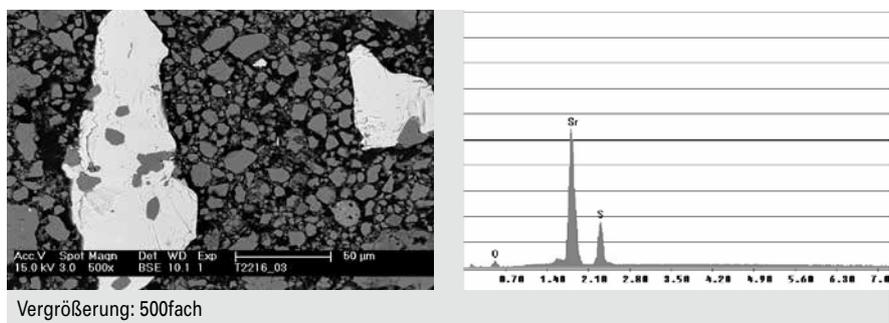


Bild II-25: Strontium-Schwefelverbindungen in Ofenmehl Z5

Klärschlammeinsatz in der Zementindustrie

Bis zum Beginn des Jahres 2001 sind in Deutschland die kommunalen Klärschlämme zu einem großen Teil im Landschaftsbau bzw. in der Landwirtschaft genutzt worden. Dieser Entsorgungsweg wird in Zukunft aus verschiedenen Gründen (im Wesentlichen Gesundheit, Hygiene und Umweltverträglichkeit) stark eingeschränkt werden. Daraus resultiert zwangsläufig die Suche nach anderen geeigneten Verwertungsmaßnahmen. Der Klinkerbrennprozess kann hierbei eine besonders interessante Option bieten, da dabei sowohl der Energieinhalt der Schlämme als auch die stofflichen Anteile des Klärschlammes genutzt werden. Aufgrund dieser positiven Merkmale werden beispielsweise in der Schweiz die kommunalen Klärschlämme bereits seit längerem in den Zementwerken eingesetzt.

Zur energetischen Nutzung der kommunalen Klärschlämme in Deutschland stehen neben Zementwerken grundsätzlich (Braunkohle-)Kraftwerke sowie Monoverbrennungsanlagen für Klärschlämme und vereinzelt auch Müllverbrennungsanlagen zur Verfügung. Das nationale Aufkommen an kommunalen Klärschlämmen bewegt sich bei etwa 2,3 bis 2,5 Mio. t Trockensubstanz pro Jahr. Eine aktuelle Zusammenstellung aus dem Bereich der Kraftwerksindustrie hat ergeben, dass die in Deutschland tätigen Energieversorger über Mitverbrennungskapazitäten für kommunale Klärschlämme in einer Größenordnung von etwa 1,3 bis 1,5 Mio. t pro Jahr verfügen. Werden die oben erwähnten anderen Verbrennungskapazitäten (Monoverbrennungsanlagen, Müllverbrennungsanlagen) berücksichtigt, verbleiben noch etwa 300 000 t Trockensubstanz pro Jahr, für die nationale Entsorgungswege zu finden sind.

Im Zusammenhang mit dem Einsatz von Klärschlämmen in Drehofenanlagen der Zementindustrie sind aus umweltpolitischer Sicht die Spurenelemente, insbesondere Quecksilber, von Bedeutung. Im Mittel liegen die Quecksilbergehalte in Klärschlämmen aufgrund neuerer Analysen zwischen 0,8 und 1,2 mg/kg. In Einzelchargen können allerdings auch höhere Werte auftreten. Im Rahmen von mehreren unabhängigen Versuchen konnte gezeigt werden, dass kommunale Klärschlämme umweltverträglich und schadlos in Zementdrehofenanlagen verwertet werden können. Die Betriebsversuche haben gezeigt, dass die Grenzwerte der 17. BImSchV sicher eingehalten werden.

Bisher sind die kommunalen Klärschlämme in den Drehofenanlagen der deutschen Zementindustrie praktisch ausschließlich in thermisch getrockneter Form (größer 95 % Trockensubstanz [TS]) eingesetzt worden. Die bei dieser Trocknung entstehenden Granalien können im Allgemeinen problemlos über herkömmliche Dosiersysteme in das System eingebracht werden. Die thermische Trocknung der kommunalen Klärschlämme erfordert allerdings einen hohen technischen Aufwand. Speziell in ländlichen Regionen kommt hinzu, dass viele kleinere Kläranlagen nicht über eigene Trocknungsanlagen verfügen. Deshalb werden derzeit erste Überlegungen angestellt, auch mechanisch entwässerte Schlämme in Drehofenanlagen der Zementindustrie einzusetzen. Hierzu sind allerdings weitere Veränderungen, beispielsweise an den Dosiereinrichtungen, erforderlich. Außerdem stellen sich im Zusammenhang mit diesen mechanisch entwässerten Schlämmen weitere Herausforderungen, beispielsweise bei Gesundheitsschutz und Hygiene.

Stand der kontinuierlichen Quecksilberemissionsmessung

Auf der Grundlage einer Änderung der 17. BImSchV aus dem Jahre 1999 müssen an Abfallverbrennungs- und Mitverbrennungsanlagen die Quecksilberemissionen kontinuierlich gemessen werden. Seitdem sind vermehrt kontinuierlich arbeitende Quecksilberemissionsmessgeräte an Drehofenanlagen der Zementindustrie installiert worden. Dabei stellte sich heraus, dass trotz einer Eignungsprüfung ein solches Messgerät nicht in jedem Fall an jeder Drehofenanlage zuverlässig zur Überwachung der Emissionen eingesetzt werden kann. Obwohl die möglichen Ursachen für die Geräteprobleme mittlerweile zum großen Teil bekannt sind, ist es nach wie vor nicht möglich, im Vorfeld eine grundsätzliche Aussage zur Einsetzbarkeit eines bestimmten Geräts an einem Drehofen zu machen. Hier ist vielmehr nach wie vor eine Einzelprüfung erforderlich. Dennoch sind mittlerweile eine Vielzahl von Drehofenanlagen der Zementindustrie in Deutschland mit kalibrierten, kontinuierlich arbeitenden Quecksilberemissionsmessgeräten ausgerüstet.

Quecksilberemissionsmessgeräte sind modular aufgebaut und bestehen aus den gasführenden Einheiten Kaminsonde, Staubfilter, beheizte Messgasleitung, Reduktionsstufe und Analysator. Prinzipiell sind zwei Typen von Messgeräten im Einsatz. Bei den so genannten thermokatalytischen Geräten werden die im Probegas

befindlichen Quecksilberverbindungen mit Hilfe eines beheizten Festbettkatalysators reduziert. Die so genannten nasschemischen Geräte verfügen hingegen über eine Reaktionsstufe mit einem flüssigen Reduktionsmittel (meist Zinn(II)Chlorid). In sämtlichen Gerätetypen detektieren Fotometer elementares, d.h. vollständig reduziertes Quecksilber. Von daher ist eine vollständige Reduktion der im Probegas befindlichen Quecksilberverbindungen eine unabdingbare Voraussetzung für die kontinuierliche Messung der Quecksilberemissionen. Derzeit werden in der Zementindustrie bevorzugt Geräte mit thermokatalytischer Reduktionsstufe eingesetzt. Dies hat vor allem praktische Gründe, da der Umgang mit Chemikalien entfällt. Je nach Abgaszusammensetzung kann es jedoch erforderlich sein, nasschemische Geräte einzusetzen, die weniger empfindlich auf bestimmte Störkomponenten in der Abgasmatrix reagieren.

Die Messempfindlichkeit von Quecksilberemissionsmessgeräten ist im Vergleich zu herkömmlichen Messeinrichtungen, z. B. zur NO_x -, SO_2 - oder Gesamt-Kohlenstoff-Messung, deutlich höher. An die Leistungsfähigkeit der Hg-Mess- und Prüftechnik sind entsprechend hohe Qualitätsanforderungen gekoppelt. Um die Anforderungen an die Linearität der Kennlinie sowie die Nullpunkt- und Referenzpunkt drift zu erfüllen, müssen die Güte der Gerätebauteile sowie die Art der zum Einsatz kommenden Reagenzien oder Katalysatoren so beschaffen sein, dass sie der dauerhaften Belastung im Messbetrieb standhalten. In der Betriebspraxis war es im Einzelfall erforderlich, nach einer Versuchsphase von einigen Wochen das Messgerät am Kamin zu modifizieren, um es auf die besondere Abgaszusammensetzung der Emissionsquelle abzustimmen.

Solche Modifikationen betrafen beispielsweise den Einbau eines Hochfluss-Bypasses zur Minimierung von Wandeffekten bei überlangen Messgasleitungen zwischen Kamin und Messgerät. In anderen Fällen wurden Spüloptionen eingebaut, um den Messgasweg von salzartigen Ablagerungen zu reinigen. Bisweilen auftretende Zinnoxidfällungen sollten durch eine Änderung der Reduktionslösung vermieden werden.

Um die Quecksilberemissionen einer Drehofenanlage zuverlässig kontinuierlich messen zu können, muss das entsprechende Gerät zunächst kalibriert werden. Hier hat sich zwischenzeitlich herausgestellt, dass – teilweise nach vorherigen standortspezifischen Modifikationen der Geräte – die

meisten Geräte die Mindestanforderungen, die an die Kalibrierfähigkeit automatischer Messeinrichtungen gestellt werden, erfüllen. Allerdings gibt es auch eine Reihe von Fällen, in denen eine zuverlässige kontinuierliche Überwachung der Quecksilberemissionen nach wie vor nicht möglich ist. Das Forschungsinstitut der Zementindustrie arbeitet diesbezüglich mit den Geräteherstellern und den Anlagenbetreibern eng zusammen, um die noch bestehenden Probleme zu lösen.

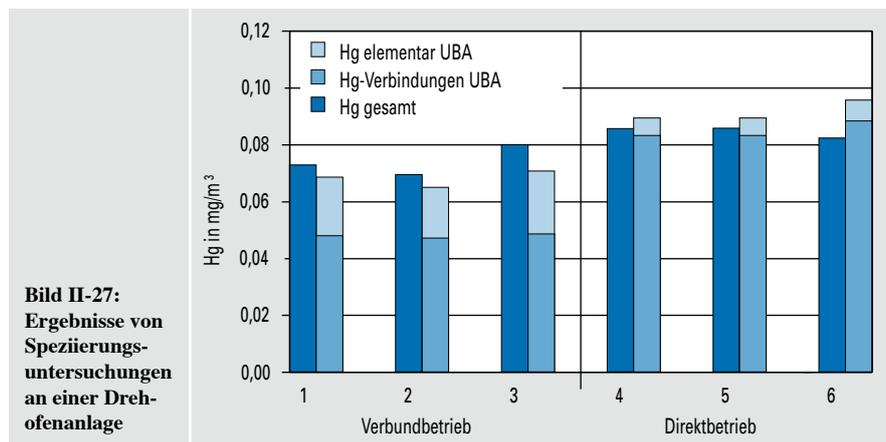
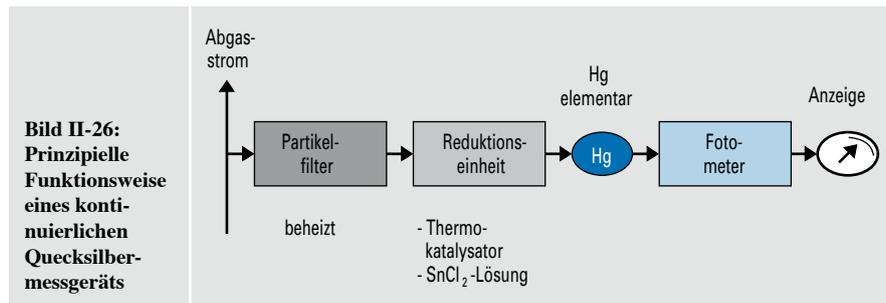
Neben dem Einfluss, den die unterschiedliche Abgaszusammensetzung haben kann, führten beispielsweise an verschiedenen Standorten auch Ablagerungen (vermutlich sublimierte Ammoniumsalze) in Messgasleitungen zu Fehlanzeigen der Messgeräte. Diese Schwierigkeiten konnten allerdings in den meisten Fällen durch eine entsprechende Gerätemodifikation behoben werden. Speziell bei den thermokatalytischen Geräten konnte darüber hinaus in Einzelfällen auch durch eine Erhöhung der Katalysatortemperatur eine Leistungsverbesserung erzielt werden.

Eine wesentliche Voraussetzung für einen auch längerfristig gesicherten Einsatz der kontinuierlichen Quecksilberemissionsmesstechnik ist eine sorgfältige Durchführung der Geräterwartung, der regelmäßigen Funktionsprüfungen und der Kalibrierungen. Insbesondere bei der Funktionsprüfung sollte darauf geachtet werden, dass die vollständige Messeinrichtung möglichst sowohl mit elementarem als auch mit ionischem Quecksilberprüfgas beaufschlagt wird. Auf diese Weise ist es möglich, ohne aufwendige Vergleichsmessungen eine schnelle Aussage über die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der Messgeräte zu treffen.

Erste Ergebnisse bei der Speziierung von Hg-Emissionen

Quecksilber liegt im Abgas von Verbrennungsanlagen, d. h. auch im Abgas von Drehofenanlagen der Zementindustrie, in unterschiedlichen Bindungsformen vor. Untersuchungen an Verbrennungsanlagen haben gezeigt, dass Quecksilber dort hauptsächlich als elementares gasförmiges Quecksilber (Hg^0) und gebundenes gasförmiges Quecksilberchlorid (HgCl_2) emittiert wird.

Das Auftreten des Quecksilbers in unterschiedlichen Bindungsformen ist eine wesentliche Ursache für die mit der kontinuierlichen Quecksilbermessung verbundenen Schwierigkeiten (s. Abschnitt links). Das zur Detektion eingesetzte Fotometer



kann lediglich elementares Quecksilber erfassen. Die Quecksilberverbindungen müssen daher in einer vorgeschalteten Stufe, der so genannten Reduktionseinheit, in elementares Quecksilber umgewandelt werden. Am Markt verfügbar sind derzeit Geräte, die einen Thermokatalysator oder Zinn(II)Chlorid-Lösung zur Reduktion einsetzen (Bild II-26). Die Zusammensetzung der Abgasmatrix kann die Effektivität der Reduktionseinheit erheblich herabsetzen. Eine kontinuierliche Quecksilbermessung ist dann nur durch eine auf den Einzelfall abgestimmte Modifikation des Messgeräts möglich.

Neben der Messung der Gesamtquecksilberkonzentration werden daher auch diskontinuierliche Messverfahren eingesetzt, die eine getrennte Erfassung von elementarem Quecksilber (Hg^0) und gebundenem Quecksilber (HgCl_2) ermöglichen. Die Aufschlüsselung der Gesamtquecksilberkonzentration erfolgt nach einem vom deutschen Umweltbundesamt (UBA) entwickelten Verfahren, bei dem in einer vorgeschalteten Waschflasche mit verdünnter Salzsäure ausschließlich gebundenes Quecksilber (HgCl_2) aufgefangen wird. Die nachgeschaltete Waschflasche enthält Kaliumpermanganat als Adsorbens und sammelt in erster Linie das elementare Quecksilber aus dem Messgasstrom.

Die Ergebnisse von Untersuchungen an einer Drehofenanlage sind in Bild II-27 dargestellt. Im Verbund- und Direktbetrieb wurden jeweils 3 Messungen durchgeführt und dabei sowohl die Bestimmung der Gesamtquecksilberkonzentration nach VDI 3868, Blatt 2 als auch die Speziierung nach der UBA-Methode durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen der Gesamtquecksilberbestimmung und der Summe aus elementarem und gebundenem Quecksilber nach der UBA-Methode. An dieser Ofenanlage überwiegt im Verbund- und Direktbetrieb der Anteil an gebundenem Quecksilber. Im Direktbetrieb ist der Anteil an elementarem Quecksilber deutlich geringer als im Verbundbetrieb. Eine mögliche Ursache ist, dass an „frisches“ Rohmaterial gebundenes elementares Quecksilber bei den Temperaturen in der Rohmühle unmittelbar freigesetzt wird, ohne in den nachfolgenden Prozess zu gelangen. Da elementares Quecksilber an Staubpartikeln schlechter abgeschieden wird als gebundenes HgCl_2 , wird es ein Schwerpunkt weiterer Untersuchungen sein zu klären, inwieweit die Bindungsform des Quecksilbers die Abscheidebedingungen im Elektrofilter beeinflusst. Zudem ist zu prüfen, inwieweit das vorliegende Ergebnis auf andere Ofenanlagen übertragbar ist.



Leistungsfähigkeit von Zement

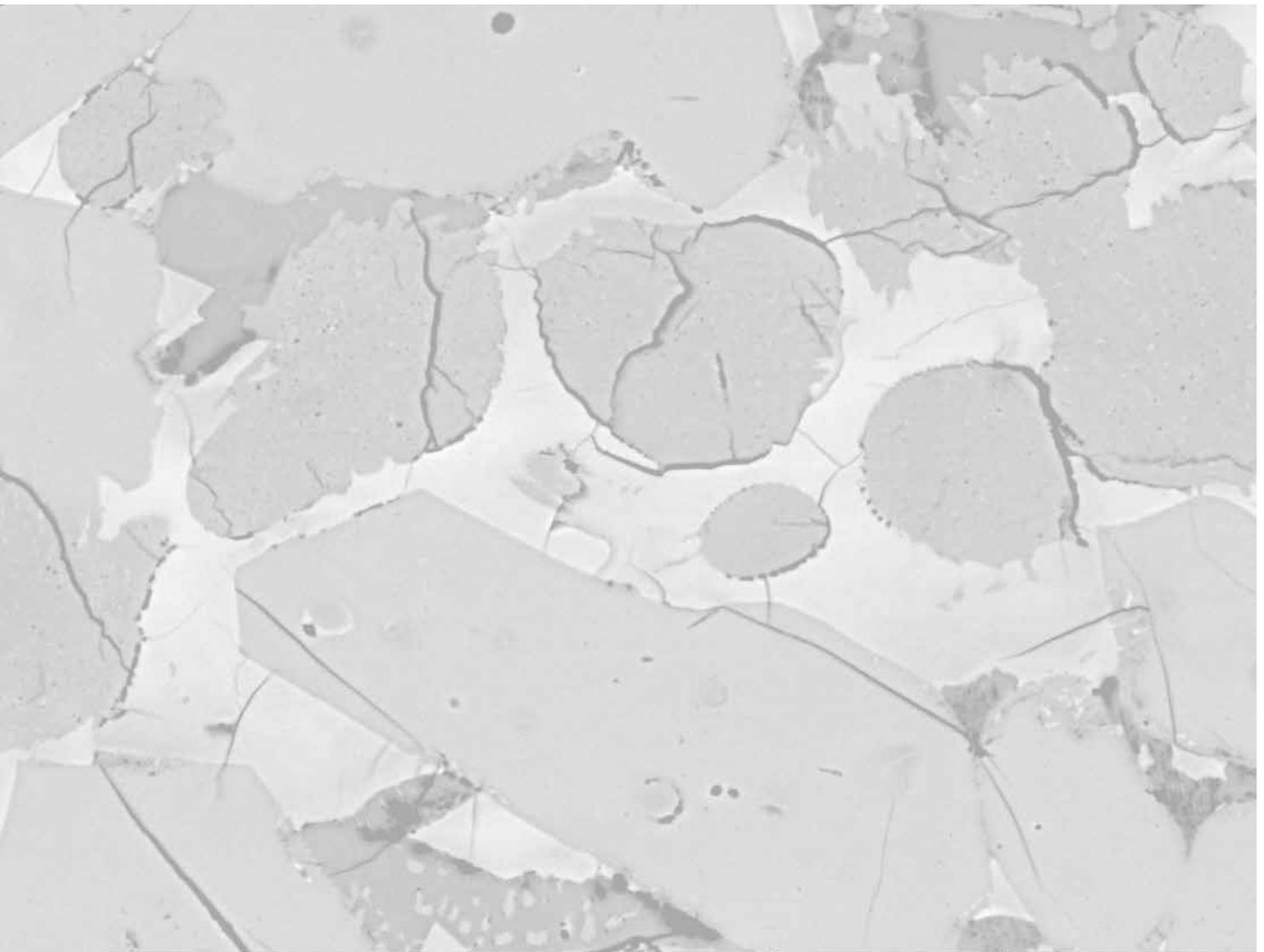
Ein Forschungsschwerpunkt im Berichtszeitraum lag auf dem Einfluss, den Phosphat auf die Leistungsfähigkeit des Klinkers haben kann. Seit der Verabschiedung des Verfütterungsverbots von Tiermehl im Jahr 2000 wird in deutschen Zementwerken Tiermehl in großem Umfang energetisch verwertet. Damit ist ein Phosphateintrag in den Klinker verbunden. Das Forschungsinstitut hat umfangreiche Untersuchungen zu den Auswirkungen erhöhter Phosphatgehalte auf die Produktqualität durchgeführt. Die Untersuchungen konzentrierten sich dabei insbesondere auf die Klinkermineralogie sowie das Erstarrungsverhalten und die Festigkeitsentwicklung.

Die Leistungsfähigkeit von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen war Gegenstand verschiedener Forschungsaktivitäten. Intensiviert wurden die Arbeiten zum Zusammenhang zwischen der chemischen Reaktivität von Hüttensanden und deren Einfluss auf die Druckfestigkeitsentwicklung der Zemente. Entgegen der bisherigen Auffassung zeigen die Ergebnisse des Forschungsinstituts, dass hohe Druckfestigkeiten insbesondere mit chemisch weniger reaktiven Hüttensanden zu erzielen sind. Neben der Reaktivität hängt die Leistungsfähigkeit von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen bekanntermaßen auch von der Mahlfeinheit der verschiedenen Komponenten ab. In diesem Zusammenhang wurden Untersuchungen an getrennt gemahlene hüttensandhaltigen Zementen durchgeführt.

Die Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Zementhauptbestandteile auf den wirksamen Alkaligehalt des Zements wurden im Berichtszeitraum fortgeführt. Gegenstand dieser Untersuchungen war es, die chemisch-mineralogischen Vorgänge, durch die eine Alkalibindung hervorgerufen wird, aufzuklären und die Stabilität der Bindung zu beurteilen.

Ein weiteres Arbeitsfeld lag in der Entwicklung neuer Mess- und Prüfverfahren sowie in der Normungsarbeit. Das Forschungsinstitut war maßgeblich an der Entwicklung eines neuen europäischen Prüfverfahrens für die Bestimmung von wasserlöslichem Chromat in Zementen und zementhaltigen Zubereitungen (prEN 196-10) beteiligt. Analytische Details der endgültigen Prüfnorm sind derzeit noch Gegenstand der Diskussion. Das Forschungsinstitut ist auch an der Entwicklung der Zementprüfnorm (EN 196-2.2) beteiligt, deren Fertigstellung 2005 erwartet wird.

Seit Mitte 2003 verfügt das Forschungsinstitut über ein isothermes Wärmeflusskalorimeter des Typs TAM-Air. Derzeit wird untersucht, ob die Wärmeflusskalorimetrie ein geeignetes Alternativverfahren zum Lösungswärmeverfahren darstellt. Auch mit der Entwicklung von Schnellprüfverfahren für die Ermittlung der Sulfatbeständigkeit von Zementen hat sich das Forschungsinstitut beschäftigt. Die Auswertung zahlreicher Versuchsergebnisse des Forschungsinstituts zeigen, dass die existierenden Schnellprüfverfahren nur für die Differenzierung des chemischen Sulfatwiderstands von Portlandzementen, nicht aber für Zement/Flugasche-Gemische belastbare Ergebnisse liefern.



Chemisch-mineralogische Zusammensetzung ■

Mit der Einführung der EN 197-1 ist europaweit eine Vielzahl unterschiedlich zusammengesetzter Zemente genormt. Seither ist auch in Deutschland die Zahl der angemeldeten bzw. bauaufsichtlich zugelassenen Zemente gestiegen. Dazu zählen insbesondere Zemente mit mehr als 2 Hauptbestandteilen. Auf dem deutschen Markt haben sich hauptsächlich die Zementarten CEM II/M(S-LL), CEM II/M(V-LL) sowie CEM IV und CEM V mit Hüttensand, natürlichen Puzzolanen oder kieselsäurereichen Flugaschen neu etabliert.

Vor diesem Hintergrund haben sich die Methoden zur quantitativen Bestimmung der Zementbestandteile weiterentwickelt. Für Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen ist in der Prüfnorm DIN V ENV 196-4 das Verfahren des selektiven Lösens als Referenzverfahren festgelegt. Stehen die Zementbestandteile einzeln zur Verfügung, kann als alternatives Verfahren die Gemischberechnung anhand eines geeigneten Satzes von Leitoxiden aus den Ausgangsstoffen eingesetzt werden. Dabei werden zunächst der Zement und seine einzelnen Bestandteile röntgenfluoreszenzanalytisch untersucht. Aus den chemischen Zusammensetzungen der einzelnen Stoffe lassen sich dann die Gehalte an Klinker und weiteren Bestandteilen im Zement durch Lösen eines linearen Gleichungssystems errechnen. Voraussetzung für die Zuverlässigkeit dieser Methode ist eine hinreichende Gleichmäßigkeit der analysierten Stoffe.

Zur Bestimmung des Hüttensandgehalts in Portlandhüttenzementen (CEM II/S) und Hochofenzementen (CEM III) wurde im Rahmen der Güteüberwachung bislang das mikroskopisch-chemische Verfahren angewendet. Die zunehmende Praxis des getrennten Mahlens und anschließenden Mischens von Klinker und Hüttensand in den Werken hat jedoch zur Folge, dass im Forschungsinstitut wieder verstärkt auf das aufwendigere Referenzverfahren des selektiven Lösens zurückgegriffen werden muss. Die mikroskopische Hüttensandzählung an der Fraktion 32-40 μm gibt bei Zementen, deren Bestandteile getrennt gemahlen wurden, nicht immer die korrekte Zusammensetzung wieder. Klinker und Hüttensand können in unterschiedlichen Kornfraktionen angereichert sein. Die Mahlfeinheiten der einzelnen Bestandteile unterscheiden sich vielfach so stark voneinander, dass sie auch nachträglich über die rechnerische Korrektur nicht erfasst

Tafel III-1: Chemische Zusammensetzung der Hüttensande (Angaben in M.-%, glühverlusthaltig)

	HS A	HS B	HS C	HS D	HS E
SiO ₂	32,96	31,96	35,09	35,90	38,01
Al ₂ O ₃	14,78	17,43	11,33	10,83	9,21
TiO ₂	0,58	0,99	1,39	0,87	0,33
P ₂ O ₅	0,18	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Fe ₂ O ₃	0,37	0,41	1,33	0,44	0,29
Mn ₂ O ₃	0,57	0,47	0,36	0,57	1,18
CaO	44,58	36,06	40,31	37,75	38,02
MgO	4,19	10,84	7,88	11,05	10,58
SO ₃	0,28	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
K ₂ O	0,62	0,45	0,63	0,78	1,03
Na ₂ O	0,39	0,42	0,42	0,47	0,39
CO ₂	0,13	0,17	0,24	0,22	0,20
H ₂ O	0,08	0,11	0,24	0,33	0,11
S ²⁻	0,58	1,29	1,40	1,47	1,22

werden können. Unsicherheiten beim selektiven Lösen sind hingegen nur dann zu erwarten, wenn die Zementbestandteile ein von der Theorie abweichendes Auflösungsverhalten zeigen. Dies gilt beispielsweise für Hüttensande mit kristallinen Anteilen von mehreren M.-%.

Reaktivität von Hüttensanden ■

Der Einsatz von Hochofenzementen hat sich in der Bauwirtschaft seit vielen Jahrzehnten bewährt. Bei ihrer Hydratation erzeugen sie geringe Hydratationswärme, so dass sie bei der Herstellung massiger Betonbauteile vorteilhaft eingesetzt werden können. Aufgrund ihres im Vergleich zu Portlandzementen geringeren Zementklinker- und damit auch geringeren C₃A-Anteils sind Hochofenzemente darüber hinaus oft in der Gruppe der sulfatbeständigen Zemente zu finden. Im Vergleich zu Portlandzement zeigen Hochofenzemente allerdings eine langsamere Festigkeitsentwicklung; vor allem in den frühen Phasen der Hydratation.

Für den gezielten und effizienten Einsatz von hüttensandhaltigen Zementen ist das Verständnis der chemischen Reaktivität von Hüttensanden und deren Auswirkung auf die physikalischen Eigenschaften von entsprechenden zementgebundenen Baustoffen notwendig. In bisherigen Forschungsarbeiten wurde fast ausschließlich angenommen, dass die Festigkeitsentwicklung hochofenzementgebundener Bau-

stoffe und die chemische Reaktivität der enthaltenen Hüttensande proportional zueinander sind. Aktuelle Forschungsarbeiten des Forschungsinstituts der Zementindustrie legen allerdings das Gegenteil nahe. Hinsichtlich der Druckfestigkeitsentwicklung leistungsstarke Hüttensande reagieren danach chemisch eher verhalten. Leistungsschwache Hüttensande reagieren dagegen in wässrigem Milieu schneller und binden mehr Wasser. Letztere formen dabei in ihren äußeren, von Wasser durchdrungenen Zonen klar differenzierte Schichten aus. Eine Schlüsselrolle bei der Hydratation von Hüttensanden spielt der Aluminiumanteil, der nach dominanten, frühen Reaktionen – vor allem mit Magnesium – noch verfügbar ist. Dieser Aluminiumanteil geht möglicherweise Verbindungen ein, die die Geschwindigkeit der weiteren Wasseraufnahme und damit auch des Hydratationsfortschritts verringern. In den diesbezüglichen wissenschaftlichen Arbeiten des Forschungsinstituts der Zementindustrie wird deutlich, dass das Ausmaß der Glaskorrosion auch in engem Zusammenhang mit dem Sulfathaushalt des hydratisierenden Zements steht. Eine Schlüsselrolle kann dabei die Bildung von Etringit spielen.

Was heißt „Reaktivität“ von Hüttensand?

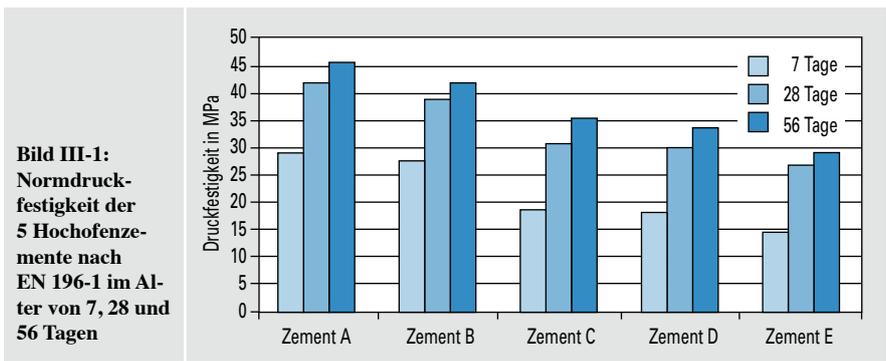
Die Reaktivität von Hüttensanden wird bislang fast ausschließlich über die Festigkeitsentwicklung hochofenzementgebundener Baustoffe definiert. Einen Hüttensand, der als Zementbestandteil zu hohen Zementnormdruckfestigkeiten führt, be-

zeichnet man als „reaktiven“ Hüttensand. Eine schnelle Festigkeitsentwicklung wird dabei mit einer schnellen chemischen Reaktion des Hüttensands gleichgesetzt. Beim Druckfestigkeitsprüfexperiment wird allerdings nicht die chemische Reaktivität, d. h. der Hydratationsgrad des Zementbestandteils Hüttensand, sondern die Druckbelastbarkeit des gesamten Normmörtelgefüges bestimmt. Die Drucklast wird dabei von den Gesteinskörnungen (Sand, Kies) getragen, die als weitgehend chemisch unreaktive Komponenten im Mörtel bzw. Beton vorliegen. Damit stellt sich die Frage, ob die chemische Reaktivität von Hüttensanden in wässrigem Milieu tatsächlich proportional zur Festigkeitsentwicklung der entsprechenden Hochofenzemente ist. Im Forschungsinstitut der Zementindustrie wurden 5 sehr unterschiedliche Hüttensande (Tafel III-1) daraufhin untersucht. Diese Hüttensande HS A bis E wurden auf eine Feinheit von ca. 3 700 cm²/g nach Blaine gemahlen. Durch Mischen der Hüttensande (65,00 %) mit Portlandzement (PZ; 29,76 %), Gips (G; 2,67 %) und Anhydrit (A; 2,67 %) wurden die entsprechenden Hochofenzemente (Zement A bis E) hergestellt (Bild III-1). Die gewonnenen neuen Forschungsergebnisse zeigen tatsächlich, dass technisch leistungsstarke Hüttensande chemisch eher träge sind.

Die Maßnahmen zur Leistungssteigerung von Hüttensanden wie feinere Aufmahlung und „chemische Anregung“ könnten deshalb zwar technisch wirksam, aber mechanistisch falsch verstanden sein. Produktoptimierung und Erhalt der technischen Leistungsmerkmale von Hochofenzementen – bei veränderlicher Hüttensandchemie etwa – kann unter solchen Voraussetzungen nur nach dem „Trial and error“-Verfahren erfolgen. Das Verstehen des Zusammenhangs zwischen chemischen Reaktionen des Hüttensandes im Konzert mit den weiteren Bestandteilen eines Hochofenzements ist daher ausgesprochen wichtig für eine gezielte und zielgerichtete Hochofenzementproduktion.

„Leistungsschwacher“ Hüttensand ist chemisch reaktiver

Schon in reinem Wasser zeigen hinsichtlich der Druckfestigkeitsentwicklung entsprechender Hochofenzemente leistungsschwächere Hüttensande eine deutlich stärkere chemische Reaktion als leistungsstarke Hüttensande. Dies zeigt sich sehr deutlich an der unterschiedlichen Wasseraufnahme der Hüttensande beim Suspendieren in entmineralisiertem Wasser (Tafel III-2). Nach der Vakuumfiltration der Suspensionen verbleiben bei Hüttensand HS E etwa



Tafel III-2: Wasseraufnahme der Hüttensande nach 7-tägigem Schütteln in entionisiertem Wasser und pH-Wert des wässrigen Extrakts

	HS A	HS B	HS C	HS D	HS E
Suspendierter Hüttensand (g)	400	400	400	400	400
Angebotenes Wasser (g)	800	800	800	800	800
Rückgewonnenes Wasser (g)	673	507	536	407	213
Adsorbiertes Wasser (g) ^{*)}	125	282	262	383	565
Absorbiertes Wasser (g)	2	11	2	10	22
pH-Wert der Suspension nach 7 Tagen	11,67	12,64	11,99	12,60	12,69

^{*)} Bei 40 °C verdampfbares Wasser (Gelwasser und physikalisch adsorbiertes Wasser)

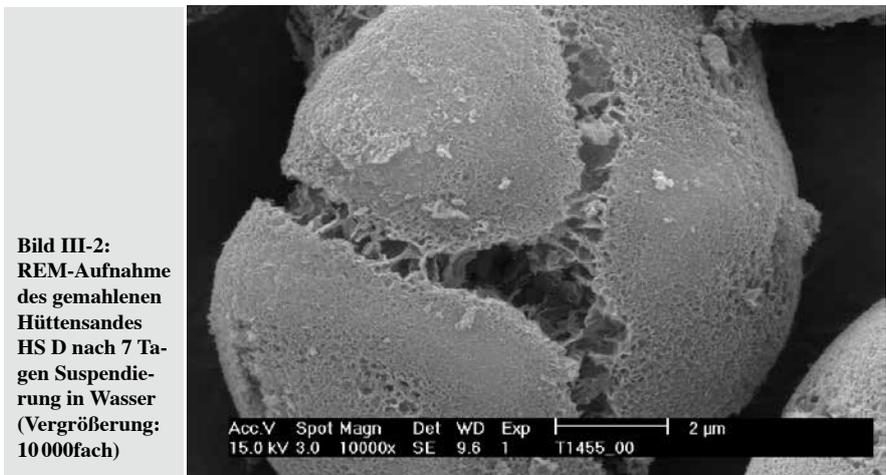


Bild III-2: REM-Aufnahme des gemahlene Hüttensandes HS D nach 7 Tagen Suspendierung in Wasser (Vergrößerung: 10 000fach)

150 % seiner eigenen Masse an Wasser im Filterkuchen, bei HS A jedoch nur etwa 30 %. Die Suspensionen der Hüttensande D und E weisen einen starken Geruch nach Schwefelwasserstoff auf und sind grünblau gefärbt. Beides trifft für die übrigen Hüttensande nicht zu.

Die unterschiedliche Wasseraufnahme der Hüttensande spiegelt sich in rasterelektronenmikroskopisch deutlich erkennbaren Veränderungen der Oberflächen der suspendierten Hüttensandpartikel wider. Durch das Schütteln der Suspensionen werden die Hüttensandkörner aneinandergerieben. Die Kornoberflächen der Hüttensande HS D und HS E sind dadurch stark

abgerundet (Bild III-2). Die Hüttensande, die hohe Zementnormdruckfestigkeiten erzeugen, weisen hingegen keine (HS A) oder geringe (HS B) Veränderungen auf (Bild III-3).

Anschliffe der in Harz gebetteten, gemahlene Hüttensande nach 7-tägiger Suspension zeigen unter dem Rasterelektronenmikroskop, dass das Wasser im Suspensionsfilterkuchen nicht nur physikalisch adsorbiert, sondern in wasserhaltigen Gelhüllen chemisch adsorbiert ist (Bild III-4).

Die pH-Werte der Suspensionsfiltrate weisen das gleiche Muster wie die Menge chemisch adsorbierten Wassers auf. Dieses

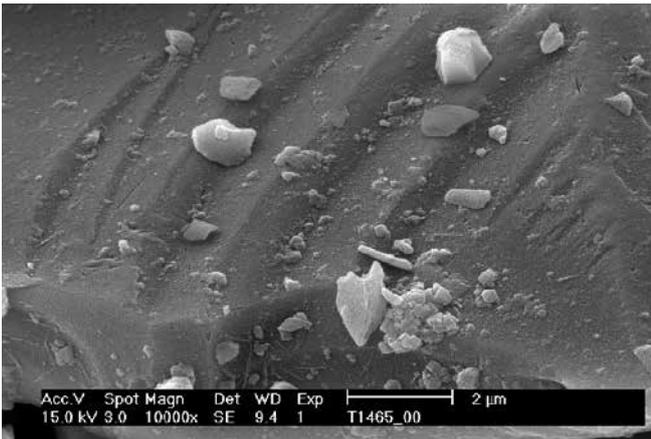


Bild III-3: REM-Aufnahme des gemahlene Hüttensandes HS A nach 7 Tagen Suspendierung in Wasser (Vergrößerung: 10 000fach)

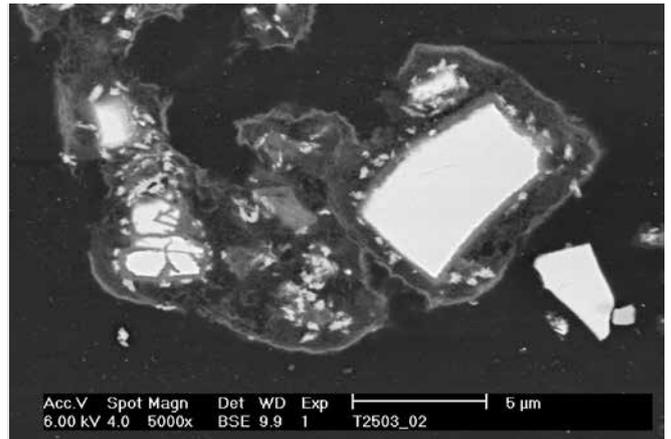


Bild III-4: REM-Aufnahme eines Anschliffpräparats des gemahlene Hüttensandes HS D nach 7 Tagen Suspendierung in Wasser (Vergrößerung: 5 000fach)

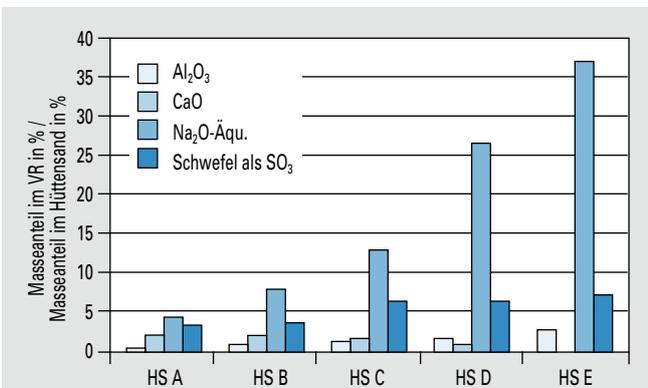


Bild III-5: Verhältnis der prozentualen Element-Oxidgehalte im Verdampfungsrückstand (VR) des Suspensionsfiltrats und im Hüttensand (glühverlustfrei)

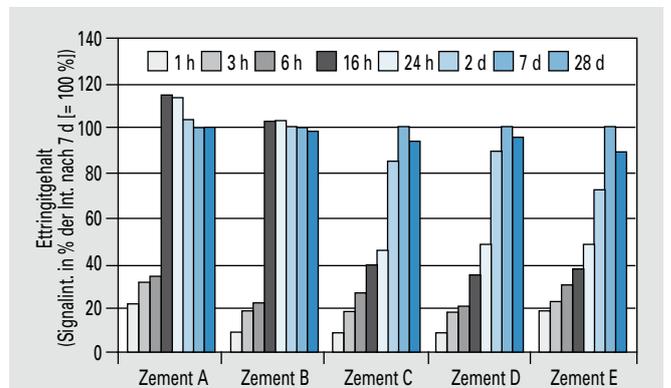


Bild III-6: Ettringitbildung in den untersuchten Zementen (Röntgendiffraktometrie; die Signalintensität des ausgewählten Ettringitreflexes nach 7 Tagen wurde auf 100 % normiert.)

Muster findet sich auch im MgO-Gehalt der Hüttensande wieder. Magnesium prägt offensichtlich die Reaktion der Hüttensande mit Wasser, d.h. ihre Korrosion.

Unterschiedliche Löslichkeit von chemischen Bestandteilen in Wasser

Ein Teil des wässrigen Filtrats aus den Suspensionen wurde bei 40 °C eingedampft, der Verdampfungsrückstand (VR) bei 960 °C geblüht und mittels Röntgenfluoreszenzanalyse chemisch charakterisiert.

Aufgrund der unterschiedlichen Anteile der chemischen Bestandteile in den Hüttensanden ist eine gewichtete Darstellung für den direkten Vergleich ihres Auflösungsverhaltens sinnvoll. Bild III-5 zeigt für einige gelöste Bestandteile das Verhältnis ihrer Anteile im Verdampfungsrückstand zum Gesamtgehalt im Hüttensand. Die Hüttensandbestandteile werden im wässrigen Teil der Suspensionen der Hüttensande HS A bis E unterschiedlich angereichert. Der relative Anteil gelösten Natriums und

Kaliums nimmt in der Reihe der nach abnehmender Leistungsfähigkeit als Zementbestandteil geordneten Hüttensande stetig zu, die gelöste Calciummenge hingegen stetig ab. Magnesium fehlt in der wässrigen Lösung. Diesbezüglich verhält es sich anders als das homologe Calcium. Der hohe Aluminiumgehalt der Hüttensande spiegelt sich in den Verdampfungsrückständen der Eluate nicht wider. Siliziumverbindungen befinden sich nur in geringem Maße in Lösung. Sie können ungelöst oder nach einer Auflösung erneut gebunden worden sein.

Phasenentwicklung in den hydratisierenden Hochofenzementen ist aufschlussreich

Der Auf- und Abbau von kristallinen Phasen in den hydratisierenden Zementen A bis E wurde röntgendiffraktometrisch beobachtet. Dazu wurde die Hydratation an Teilproben nach unterschiedlichen Zeiten (1 h, 3 h, 6 h, 16 h, 24 h, 2 d, 7 d und 28 d) durch Zugabe von Aceton gestoppt, und die Proben wurden anschließend nach Zugabe von Diethylether getrocknet. Aus den

Röntgendiffraktogrammen wurden die Signalintensitäten der einzelnen Phasen nach den unterschiedlichen Hydratationszeiten ermittelt und relativ zu einer auf 100 % normierten Signalintensität dargestellt.

Unterschiede in der Phasenentwicklung treten vor allem bei der Entstehung von Ettringit sowie beim Abbau von Gips auf. Der Aufbau von Ettringit erfolgt bei der Hydratation der Zemente A und B zwischen 6 h und 16 h sprunghaft beschleunigt (Bild III-6). Bei den Zementen C und D ist nach anfänglich gleichmäßig schneller Ettringitbildung ein leicht beschleunigter Aufbau zwischen 24 h und 2 d erkennbar. Bei Zement E steigt der Ettringitgehalt im Zeitraum von 7 d weitgehend gleichmäßig an.

Die Entwicklung des Gipsgehalts ist in den hydratisierenden Hochofenzementen umgekehrt proportional zum Ettringitgehalt. Bei den Zementen A und B ist der Gipsgehalt nach 16 Stunden im Vergleich zu den anderen Hochofenzementen stark

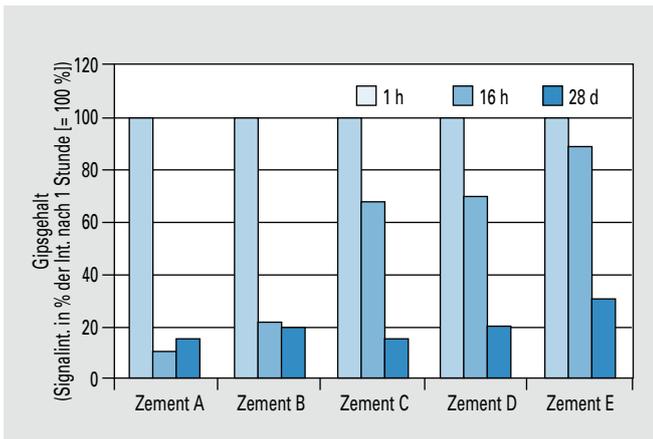


Bild III-7: Änderung des Gipsgehalts in den untersuchten Zementen nach 1 und 16 Stunden sowie 28 Tagen (Röntgendiffraktometrie)

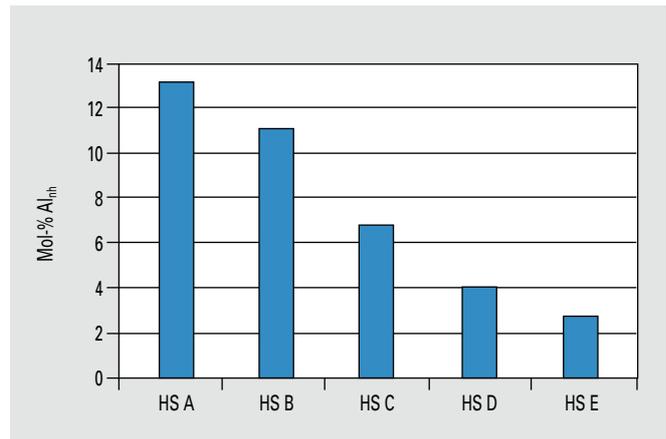


Bild III-8: Berechneter Anteil (in Mol-%) des Aluminiums der Hüttensande HS A bis HS E, der nicht für die Bildung von Hydroxalzit benötigt wird (Al_{nh})

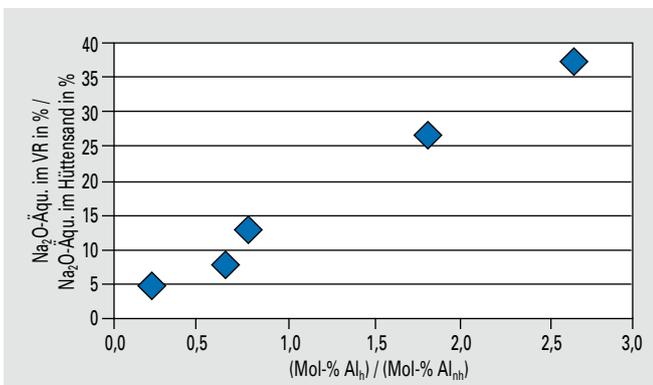


Bild III-9: Beziehung zwischen dem relativen gelösten Alkalianteil (Na₂O-Äquivalent) der Hüttensande und dem Verhältnis des in Hydroxalzit gebundenen und nicht gebundenen Aluminiumanteils der Hüttensande

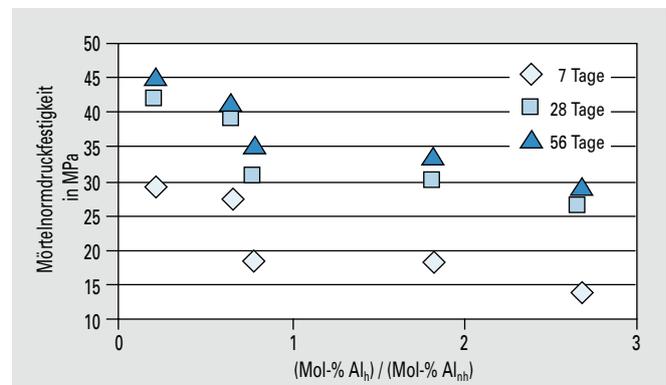


Bild III-10: Beziehung zwischen Mörtelnormdruckfestigkeit (EN 196-1) der Hochofenzemente und dem Verhältnis des in Hydroxalzit gebundenen und nicht gebundenen Aluminiumanteils der Hüttensande

reduziert (Bild III-7), da der verstärkte Ettringit- und Sulfatverbrauch die Auflösung von Gips fördert. Dementsprechend ist der nach gleicher Hydrationszeit noch vorhandene Gipsgehalt der Zemente C und D größer als bei den beiden zuvor genannten Zementen. Die Zemente C und D sind hinsichtlich ihres Gipsgehaltes zudem beinahe identisch. Übereinstimmung zeigen diese Zemente auch bei den Zementnormdruckfestigkeiten nach 7 und 28 Tagen Hydratation.

Die Rolle von Magnesium und Aluminium

Diese vorgestellten Beobachtungen zeichnen ein neues Bild von der Bedeutung der chemischen Reaktionen der Hüttensande während der Hydratation der entsprechenden Hochofenzemente. Wasser wird von den Hüttensanden aufgenommen. Es dringt in die Hüttensandglasstruktur ein und setzt leicht lösliche Bestandteile wie Alkalien aus dem Hüttensandglas frei. Die Menge der aus der von Wasser durchdrungenen Glasschicht freigesetzten Alkalien ist dabei

proportional zur Wassereindringtiefe. Magnesium prägt offensichtlich die Reaktivität der Hüttensande gegenüber Wasser (s.o.). In der Literatur wird der bevorzugte Einbau von Magnesium zusammen mit Aluminium in die hydroxalzitähnliche Phase $[Mg_4Al_2(OH)_{14} \cdot 3 H_2O]$ beschrieben. Bei dieser dominanten Reaktion wird nur ein Teil des Aluminiums der Hüttensande verbraucht (Al_h). Der nicht verbrauchte Aluminiumanteil (Al_{nh}) steht – wie bei anderen Gläsern – für glaskorrosionshemmende Reaktionen zur Verfügung, die die Bildung der hydroxalzitähnlichen Phase erschweren. Dieser korrosionshemmende Aluminiumanteil lässt sich nach der chemischen Formel für die hydroxalzitähnliche Phase $[Mg_4Al_2(OH)_{14} \cdot 3 H_2O]$ in Mol-% berechnen zu: $Mol\text{-}\% Al_{nh} = Mol\text{-}\% Al_{gesamt} - 0,5 Mol\text{-}\% Mg_{gesamt}$. Er nimmt von HS A nach HS E stetig ab (Bild III-8).

Die Stärke der korrodierten Glasschicht und damit auch die Menge der freigesetzten Alkalien ist demnach nicht allein abhängig von der aufgenommenen Was-

sermenge, sondern vor allem proportional zum Verhältnis des Aluminiumanteils, der in Form der hydroxalzitähnlichen Phase gebunden wird ($Mol\text{-}\% Al_h = 0,5 Mol\text{-}\% Mg_{gesamt}$), zu dem Aluminiumanteil, der nach der Hydroxalzitbildung für die Bildung korrosionshemmender Reaktionsprodukte noch zur Verfügung steht ($Mol\text{-}\% Al_{nh}$) (Bild III-9).

Die Zementnormdruckfestigkeit ist dagegen nur bei 4 der 5 Hochofenzemente proportional zum Verhältnis $Mol\text{-}\% Al_h / Mol\text{-}\% Al_{nh}$. Hüttensand HS C folgt dieser Beziehung nicht (Bild III-10).

Bei Hüttensand C könnte der korrosionshemmende Aluminiumanteil auch durch die Bildung anderer Verbindungen verringert sein. Dieser tatsächlich verfügbare korrosionshemmende Aluminiumanteil lässt sich nicht direkt bestimmen. Er kann allerdings im Zuge dominanter chemischer Reaktionen, wie z.B. der Ettringitbildung, gebunden werden. Bei einem Hüttensand mit höherem verfügbarem Aluminiuman-

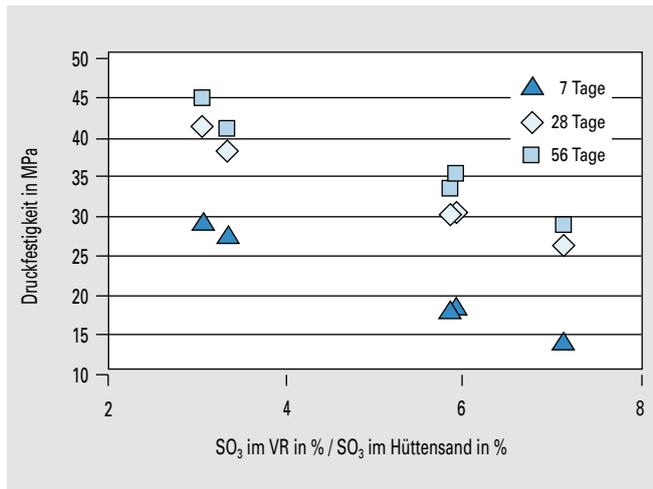


Bild III-11: Beziehung zwischen dem gelösten Sulfatanteil im Suspensionsfiltrat der Hüttensande und der Zementnormdruckfestigkeit nach EN 196 Teil 3

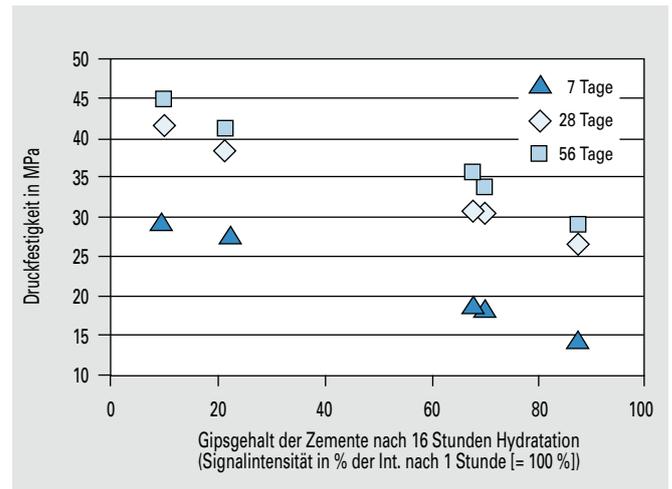


Bild III-12: Beziehung zwischen dem Gipsgehalt der Hochofenzemente nach 16 Stunden Hydratation und der Zementnormdruckfestigkeit nach EN 196 Teil 1

teil müsste der Anteil an nicht oxidiertem bzw. nicht z.B. in Ettringit gebundenem Schwefel besonders gering sein. Die Zementnormdruckfestigkeit ist dann auch umgekehrt proportional zum verfügbaren (löslichen) Schwefelanteil der Hüttensande, der indirekt als Sonde für den tatsächlich verfügbaren Aluminiumanteil dienen kann. Diese Beziehung gilt tatsächlich für alle 5 Hüttensande (Bild III-11).

Der Schwefel in den Hüttensanden liegt fast ausschließlich als Sulfid vor. Für eine Einbindung in Ettringit muss dieser zunächst zu Sulfat oxidiert werden. Die Oxidation von Sulfid zu Sulfat ist eine chemische Gleichgewichtsreaktion, die durch den Verbrauch des gebildeten Sulfats infolge Ettringitbildung unterstützt wird. Auf den Oberflächen der Partikel von HS A und HS B sind bereits im Anlieferungszustand Ettringitnadeln zu finden. Der geringe verfügbare Aluminiumanteil von HS D und HS E erklärt die stärkere Schwefelwasserstofffreisetzung aufgrund schwächerer Sulfidoxidation beim Suspendieren dieser Hüttensande. In den untersuchten Hochofenzementen steht dagegen Sulfat in Form von Gips und Anhydrit in deutlich größerem Maße zur Verfügung. Bei einer verstärkten Bildung von Ettringit mit dem Aluminiumüberschuss der Hüttensande, der nicht für den Aufbau hydrotalcitähnlicher Phasen benötigt wird, muss sich der Sulfatverbrauch in den untersuchten Hochofenzementen unterscheiden. Die auffälligen Unterschiede der Hochofenzemente hinsichtlich der Ettringitbildung vor allem nach 16 Stunden Hydratation spiegelt sich sehr deutlich im Gipsgehalt der Hochofenzemente nach gleicher Hydratationszeit wider. Indirekt ist durch diesen Ettringitaufbau und den Gipsver-

brauch die unterschiedliche Verfügbarkeit von Aluminium auch in den verschiedenen Hochofenzementen deutlich erkennbar. Der Abbau einer definierten Menge Gips in den untersuchten Hochofenzementen korreliert sehr gut mit der Zementnormdruckfestigkeit nach 7, 28 und 56 Tagen (Bild III-12).

Mit der Bindung von Sulfat in Ettringit als indirekte Sonde zur Ermittlung des verfügbaren Aluminiumanteils der 5 Hüttensande lässt sich eine lineare Beziehung zwischen der Reaktivität von *Hüttensanden* und der Normdruckfestigkeit der entsprechenden *Hochofenzemente* herstellen.

Auswirkungen des Phosphatgehalts auf die Zementeigenschaften ■

Seit der Verabschiedung des in Deutschland unbefristeten Verfütterungsverbots von Tiermehlen und -fetten Ende 2000 stehen jährlich etwa 750 000 t an Tiermehlen und 370 000 t an Tierfetten zur Entsorgung an. Davon wurden im Jahr 2003 rund 452 000 t als Sekundärbrennstoffe bei der Zementherstellung genutzt.

Mit der Verwendung von Tiermehl beim Klinkerbrennprozess ist im Allgemeinen ein vermehrter Phosphateintrag verbunden. In der Praxis bestehen überwiegend positive Erfahrungen hinsichtlich der Produktqualität, solange der Phosphatgehalt im Zementklinker deutlich unterhalb von 1 M.-% liegt. Die Auswirkungen höherer Phosphatgehalte auf die Klinkermineralogie und damit auf das Erstarrungsverhalten und die Festigkeitsentwicklung von Zement waren bislang noch nicht hinrei-

chend bekannt. Aus diesem Grund wurde im Forschungsinstitut der Zementindustrie ein Forschungsvorhaben durchgeführt, das die grundlegenden Wirkungsmechanismen des Phosphats jenseits der bisherigen Erfahrungswerte ermitteln sollte.

Im Labor wurden Klinker mit repräsentativer Zusammensetzung und Phosphatgehalten von bis zu 8,0 M.-% P₂O₅ gebrannt. Dabei wurde der Einfluss des Phosphatgehalts auf den Verlauf der chemisch-mineralogischen Reaktionen in Abhängigkeit von der Temperatur beobachtet. Im Anschluss wurden aus den Klinkern Zemente hergestellt und hinsichtlich ihrer Produkteigenschaften untersucht. Neben der Durchführung der üblichen genormten Zementprüfverfahren wurde besonderes Augenmerk auf anwendungsnahe Prüfbedingungen gelegt. Somit galt das Interesse auch dem Temperatureinfluss auf die Zementhydratation und die Festigkeitsentwicklung sowie der Wechselwirkung mit marktüblichen Fließmitteln.

Einfluss von Phosphat auf die Klinkerzusammensetzung

Die Untersuchungen zeigten, dass Phosphat aktiv an den Reaktionen während des Klinkerbrandes beteiligt ist und die Stabilitätsgrenzen einzelner Phasen verschiebt. Dabei ist es so mobil, dass es auch bei einer äußerlichen Zufuhr weitgehend gleichmäßig über den Granalienquerschnitt der Klinker nachgewiesen werden kann. Das Phosphat wird während des Klinkerbrennprozesses zunächst an Calcium in Form des Hydroxylapatits gebunden. Bei höheren Temperaturen wird dieser instabil und reagiert mit Silicium zunächst zu einem Mischkristall aus Dicalciumsilicat und Tricalciumphosphat (C₂S-C₃P), der

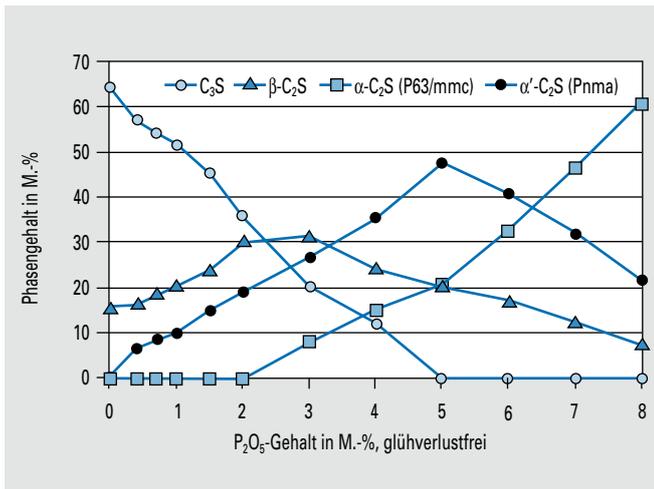


Bild III-13: Silicatischer Phasenbestand von Laborklinkern in Abhängigkeit vom Phosphatgehalt

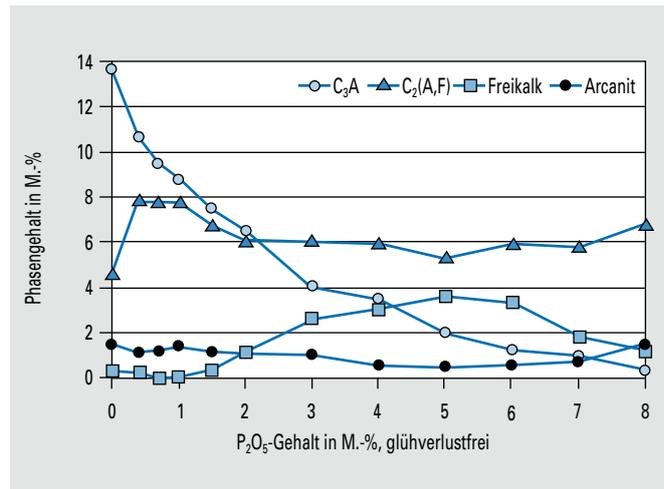


Bild III-14: Weiterer Phasenbestand von Laborklinkern in Abhängigkeit vom Phosphatgehalt

mit β - C_2S lückenlos mischbar ist. Reicht das CaO -Angebot aus, kann dieser phosphathaltige Mischkristall weiter zu einem phosphathaltigen Alit reagieren. Bedingt durch den Phosphateintrag verringert sich die Viskosität der Klinkerschmelze, so dass das Alitwachstum begünstigt wird. Mit zunehmendem Phosphateintrag bilden sich C_2S - C_3P -Mischkristalle mit der Struktur von α' - C_2S und α - C_2S (Bild III-13). Diese Verbindungen können überstöchiometrisch Calcium einbauen. Daher steigt der Freikalkgehalt bei Phosphatgehalten von > 2 M.-% P_2O_5 zunächst etwas an (Bild III-14), nimmt aber bei Phosphatgehalten von > 5 M.-% mit zunehmendem Anteil von α' - C_2S und α - C_2S wieder ab. In den Dicalciumsilicaten wird anteilig mehr Aluminium als in den mit steigendem Phosphateintrag abnehmenden Alit eingebaut. Die Grundmassephasen nehmen somit in Summe ab, wobei sich vor allem der C_3A -Anteil reduziert (Bild III-14). Die aluminhaltigen Phasen bleiben phosphatfrei.

Einfluss von Phosphat auf die Produkteigenschaften

Die Auswirkungen steigenden Phosphateintrags in den Klinker auf die Produkteigenschaften wurden an Laborzementen aus Klinkern mit P_2O_5 -Gehalten von bis zu 2,0 M.-% ermittelt. Die Frühfestigkeiten sinken bis zu ca. 1,0 M.-% P_2O_5 im Klinker bedingt durch den reduzierten Alit- und C_3A -Gehalt zunächst nur geringfügig. Bei höheren Phosphatgehalten nehmen sie dann stärker ab. Durch eine Erhöhung des Kalkstandards im Klinker kann der Verringerung des Alitgehalts und dem damit verbundenen Frühfestigkeitsverlust entgegengewirkt werden. Die 28-Tage-Festigkeiten nehmen bis 1,0 M.-% P_2O_5 leicht zu und sinken bis 2,0 M.-% P_2O_5 wieder

auf das Ausgangsniveau des phosphatfreien Vergleichzements. Bedingt durch den abnehmenden C_3A -Gehalt sinkt der Sulfatbedarf, der benötigt wird, um ein optimales Erstarrungsverhalten sicherzustellen. Bleibt das Sulfatangebot gleich, nehmen die Erstarrungszeiten zunächst zu. Mit weiter abnehmendem C_3A -Gehalt führt dies, bei gleich bleibendem Sulfatangebot, zu einer Übersulfatisierung und der Bildung von Sekundärgips, der die Erstarrungszeiten wiederum verkürzt. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Einbindung des Phosphats im Klinker sich weniger auf die primäre Ettringitbildung auswirkt, sondern den Festigkeitsaufbau aufgrund einer verzögerten Bildung von CSH-Phasen behindern kann. Ein Einfluss von Phosphat auf die Wirkung von Fließmitteln konnte nicht beobachtet werden. Die Auswirkungen auf das Hydratationsverhalten bei Verwendung von Polycarboxylatether waren beispielsweise bei den untersuchten Mischungen sowohl bei 20 °C als auch bei 8 °C nur gering. Allerdings wurden bei 8 °C und Verwendung von Calciumligninsulfonat, das aufgrund seines Wirkstoffs verzögernd wirken kann, nur sehr geringe Frühfestigkeiten beobachtet. Dies ist jedoch nicht auf eine Wechselwirkung des Phosphats mit den Fließmitteln, sondern lediglich auf die zusätzliche, auch ohne Fließmittel beobachtete Minderung der Frühfestigkeit durch den Phosphateintrag in den Klinker zurückzuführen.

Die Untersuchungen zeigten, dass sich Phosphatgehalte von bis zu 1,0 M.-% nicht nachteilig auf die Klinker- und Zementeigenschaften auswirken. Der mit zunehmendem Phosphateintrag steigende Calcium-Bedarf kann jedoch eine Abnahme des Alit-Gehalts im Klinker bewirken

und zur Herabsetzung insbesondere der Frühfestigkeit von Zement führen. Dieser Einfluss lässt sich durch eine Erhöhung des Kalkstandards vermindern.

Einfluss der Korngrößenverteilung von Hauptbestandteilen des Zements

Seit einigen Jahren werden die Eigenschaften von Zementen mit getrennt gemahlene und anschließend gemischten Hauptbestandteilen systematisch untersucht. Vorrangig wurden hierbei Zemente mit Hüttensandgehalten von 25, 50 und 75 M.-% betrachtet (siehe auch Tätigkeitsbericht 2001-2003). Die Zemente wurden i.d.R. mit einem Gesamtsulfatgehalt von 3,5 M.-% eingestellt, der zu 50 % aus schwer löslichem Sulfat (Anhydrit) und zu 50 % aus leicht löslichem Sulfat (Summe aus Klinker- SO_3 und zugesetztem Halbhydrat) bestand.

Hüttensandhaltige Zemente mit unterschiedlichen Feinheiten der Hauptbestandteile

Im Berichtszeitraum wurden weiterführende Untersuchungen an Zementen konstanter Feinheit durchgeführt, deren Hauptbestandteile jedoch deutlich unterschiedliche Feinheiten aufwiesen. Die Hauptbestandteile hatten stets eine breite RRSB-Korngrößenverteilung mit einem Steigungsmaß $n = 0,8$. Es zeigte sich beispielsweise, dass CEM II/B-S-Zemente mit 25 M.-% Hüttensand und einer Feinheit des Klinker-Hüttensand-Gemisches von $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ (nach Blaine) sowie CEM III/A-Zemente mit 50 M.-% Hüttensand und einer Gemischfeinheit von $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ (nach Blaine) nur sehr geringfügig hin-

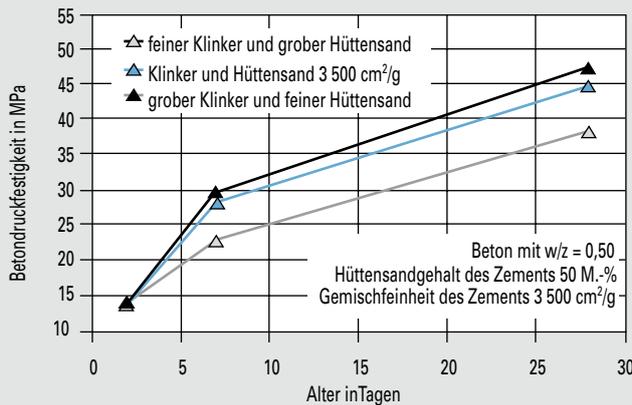


Bild III-15: Festigkeitsentwicklung von Betonen unter Verwendung von CEM III/A-Zementen mit unterschiedlichen Feinheiten der Hauptbestandteile in Abhängigkeit vom Prüflalter

sichtlich der Frühfestigkeit beeinflussbar waren. Die Ergebnisse machen außerdem deutlich, dass Zemente mit grobem Hüttensandanteil und feinem Klinkeranteil zu geringeren Werten in der 28-Tage-Druckfestigkeit führten als Zemente mit feinem Hüttensand und grobem Klinker. Unter der Voraussetzung einer konstanten Zementfeinheit wurde ein nahezu unveränderter Wasseranspruch ermittelt, obgleich die Feinheiten der Hauptbestandteile variierten. Bei der Anwendung dieser Zemente im Beton mit einem w/z-Wert von 0,50 bestätigten sich die Ergebnisse aus der Normmörtelprüfung.

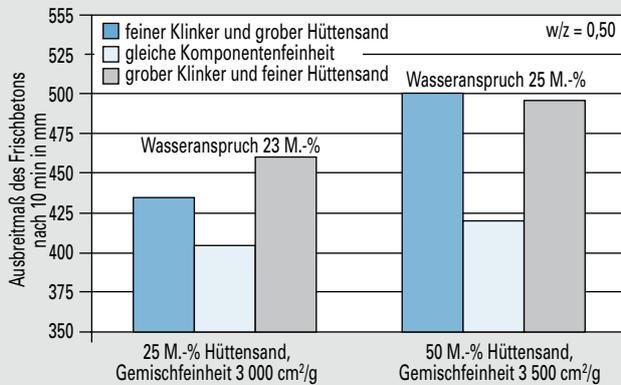


Bild III-16: Frischbetonkonsistenz unter Verwendung von Zementen mit unterschiedlichen Feinheiten der Hauptbestandteile

Aus Bild III-15 geht hervor, dass die Betondruckfestigkeit nach 7 bzw. 28 Tagen besonders geringe Werte erreichte, wenn der hier eingesetzte CEM III/A-Zement aus einem groben Hüttensandmehl und einem feinen Klinkermehl hergestellt wurde. Darüber hinaus wurde aufgrund der Kombinationen unterschiedlicher Feinheiten der Hauptbestandteile auch die Verarbeitbarkeit des Frischbetons beeinflusst. Das Ausbreitmaß 10 bzw. 45 Minuten nach Herstellung des Betons wies umso höhere Werte auf, je größer die Feinheitenunterschiede zwischen den Zementhauptbestandteilen eingestellt waren. Bild III-16 ist am Beispiel der Betone mit CEM III/A-Zementen (3 500 cm²/g) zu entnehmen, dass bei deutlich unterschiedlichen Feinheiten der Zementhauptbestandteile nach 10 Minuten eine sehr weiche (F4), bei gleich feinen Zementhauptbestandteilen nur eine weiche Frischbetonkonsistenz (F3) entstand. Beim CEM II/B-S-Zement mit 3 000 cm²/g konnte mit unterschiedlichen Feinheiten der Hauptbestandteile eine weiche Konsistenz (F3), bei gleichen Feinheiten hingegen nur eine plastische Konsistenz (F2) erzielt werden.

Tafel III-3: Übersicht der aus einem Klinker und einem Hüttensand hergestellten Zemente

Zement	Hüttensandanteil	Feinheit der Hauptbestandteile	RRSB-Steigungsmaß der Korngrößenverteilung der Hauptbestandteile
CEM I	0	2 500 bis 5 000 cm²/g (einschließlich Werkszemente)	n = 0,8 bis n = 1,0
CEM II/B-S*)	25 M.-%	3 000 und 4 000 cm²/g	n = 0,8 bis n = 1,0
CEM III/B*)	75 M.-%	3 000 und 4 000 cm²/g	n = 0,8 bis n = 1,0

*) Gleiche Korngrößenverteilung der Hauptbestandteile

Zusammenhang zwischen der Korngrößenverteilung des Zements und seiner 28-Tage-Druckfestigkeit

Sowohl die massebezogene Oberfläche als auch das Steigungsmaß der RRSB-Verteilung bestimmen die Festigkeitswerte des Zements. Bei der Veränderung von nur einem granulometrischen Parameter können die Auswirkungen auf die Festigkeitsentwicklung gut abgeschätzt werden. Werden durch gezielte Einstellung der Mahlanlagen Steigungsmaß und massebezogene Oberfläche gleichzeitig verändert, können sich die Auswirkungen auf die Festigkeitsentwicklung verstärken oder auch kompensieren. So kann beispielsweise eine Verringerung der massebezogenen Zementoberfläche ohne Auswirkungen auf die Normfestigkeit

bleiben, wenn gleichzeitig das RRSB-Steigungsmaß der Korngrößenverteilung des Zements erhöht wird. Im Berichtszeitraum wurde untersucht, inwieweit es einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Korngrößenverteilung eines Zements konstanter Zusammensetzung und seiner 28-Tage-Festigkeit gibt, der unabhängig vom Steigungsmaß und unabhängig von der massebezogenen Zementoberfläche besteht. Die untersuchten Zemente und ihre Kenngrößen sind in **Tafel III-3** dargestellt.

In **Bild III-17** wurde die 28-Tage-Druckfestigkeit von CEM I-, CEM II/B-S- und CEM III/B-Zementen über der Korngröße bei einem Durchgangswert von 95 % der jeweiligen Korngrößenverteilung aufgetragen. In diesem Bild sind Labor- und Werkszemente mit unterschiedlichen Mahlfeinheiten, RRSB-Steigungsmaßen und Zusammensetzungen enthalten. Grundlage der Zemente war ausschließlich ein Klinker. Die Ergebnisse zeigen, dass es eine gute Korrelation gibt. Die 28-Tage-Druckfestigkeit ist umso geringer, je größer die so genannte D-95%-Korngröße ist. Für jede der 3 Zementarten stellt sich jeweils ein annähernd linearer Zusammenhang dar.

Untersuchungen zur Optimierung der 2- und 28-Tage-Zementdruckfestigkeit

Die D-95%-Korngröße ist besonders dann eine geeignete Regelgröße, wenn die Zemente getrennt gemahlen und anschließend gemischt werden. Auf diese Weise lässt sich die 28-Tage-Zementdruckfestigkeit separat optimieren, und die Zemente können somit in den verschiedenen Bereichen ihrer Korngrößenverteilungsfunktion abgestimmt werden. Häufig ist für den im Feinkornbereich liegenden Teil der Verteilungskurve ein größerer Anstieg wünschenswert, um einen hohen reaktiven Feinanteil < 32 µm zu erzielen und damit die Frühfestigkeit zu steigern. Im Grobkornbereich müsste die Kurve etwas flacher verlaufen, um die D-95%-Korngröße anzuheben und somit die 28-Tage-Festigkeit zu begrenzen. Dies lässt sich beispielsweise durch das Mischen eines feinen Klinkermehls enger Kornverteilung mit einer kleinen Menge groben Hüttensandmehls breiter Korngrößenverteilung erfolgreich realisieren. Die Untersuchungen anderer Stoffkombinationen sind derzeit noch nicht abgeschlossen.

In **Bild III-18** ist die Festigkeitsentwicklung von drei CEM II/B-S-Zementen mit 25 M.-% Hüttensand dargestellt. Die Zemente hatten die gleiche chemisch-mi-

Bild III-17: 28-Tage-Zementdruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Korngröße bei einem Durchgang der Korngrößenverteilung von 95 %

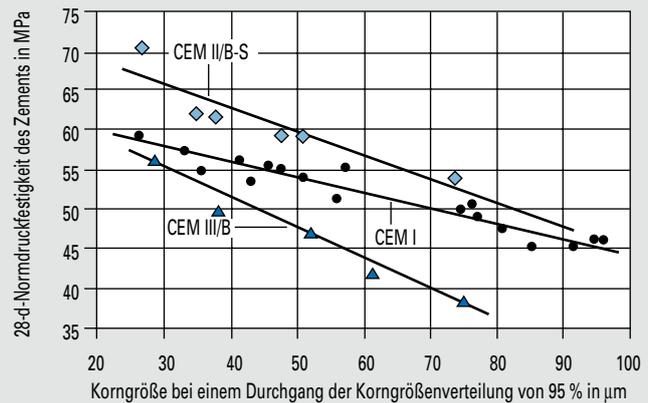
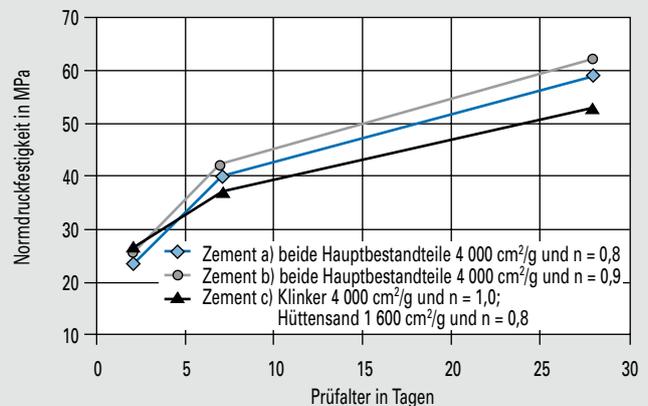


Bild III-18: Festigkeitsentwicklung von CEM II/B-S-Zementen mit 25 M.-% Hüttensand



neralogische Zusammensetzung, jedoch unterschiedliche granulometrische Eigenschaften. Die Hauptbestandteile des Zements a) und die Hauptbestandteile des Zements b) wiesen jeweils vergleichbare Korngrößenverteilungen auf. Der Festigkeitsunterschied zwischen beiden Zementen ist auf die unterschiedlichen RRSB-Steigungsmaße von n = 0,8 bzw. n = 0,9 zurückzuführen. Beim dritten Zement c) unterscheiden sich hingegen die Korngrößenverteilungen der Hauptbestandteile Klinker und Hüttensand deutlich. Betrug das RRSB-Steigungsmaß des Klinkers n = 1,0, so hatte das Hüttensandmehl eine vergleichsweise breite Korngrößenverteilung mit n = 0,8. Darüber hinaus unterschieden sich die massebezogenen Oberflächen der Hauptbestandteile um mehr als 2000 cm²/g. Im Vergleich zu den Zementen a) und b) konnte beim Zement c) aufgrund der engen Korngrößenverteilung des Klinkers die Frühfestigkeit um insgesamt 1 bis 3 MPa gesteigert werden, obgleich eine geringere Zementfeinheit vorlag. Außerdem wurden beim Zement c) die 7-Tage- und die 28-Tage-Druckfestig-

keit im Vergleich zu den Zementen a) und b) reduziert. Dieser Effekt ist vorrangig auf den Einfluss des groben Hüttensandmehls zurückzuführen.

Zementfeinheit und Reaktivität

Im Rahmen zahlreicher Untersuchungen an hüttensandhaltigen Zementen wurde neben dem Einfluss der massebezogenen Oberfläche des Zements auch der Einfluss der Reaktivität der beiden Hauptbestandteile untersucht. Die chemisch-mineralogische Zusammensetzung der eingesetzten Klinker und Hüttensande ist **Tafel III-4** zu entnehmen.

Das **Bild III-19** zeigt die Festigkeitsverläufe von aus dem Klinker 3 und drei unterschiedlichen Hüttensanden hergestellten CEM II/B-S- und CEM III/B-Zementen. Die Hauptbestandteile jeder Zementart hatten jeweils die gleiche Feinheit und eine breite Korngrößenverteilung. Darüber hinaus wurden die hüttensandreichen Zemente mit einer höheren Feinheit von 4000 cm²/g hergestellt als die hüttensandarmen Zemente (mit 3000 cm²/g). Aus dem Bild geht

Tafel III-4: Chemische Analysen der Hauptbestandteile Klinker und Hüttensand (glühverlustfrei)

Stoff-Nr.	1	2	3	4	5	6
[M.-%]	Klinker	Klinker	Klinker	Hüttensand	Hüttensand	Hüttensand
SiO ₂	22,31	20,80	21,54	35,58	35,33	31,30
Al ₂ O ₃	5,64	5,39	6,04	15,39	12,07	16,69
CaO	65,72	63,51	65,52	33,88	40,60	36,79
MgO	0,92	2,26	1,27	11,34	8,88	9,99
TiO ₂	0,27	0,23	0,30	0,84	0,76	1,84
Fe ₂ O ₃	2,41	4,04	2,66	0,59	0,38	0,50
Mn ₂ O ₃	0,05	0,04	0,06	0,31	0,34	0,57
K ₂ O	0,90	1,15	0,96	0,88	0,44	0,37
Na ₂ O	0,30	0,26	0,14	0,42	0,31	0,40
Na ₂ O _{Aqu.}	0,89	1,25	0,77	1,00	0,60	0,64
SO ₃	1,12	1,10	0,74	0,01	0,01	0,26
SG	97,40	68,19	73,43	Sulfatisierungsgrad		
KST	92,98	94,48	94,70	Kalkstandard		
C ₃ S	56,77	59,00	59,10			
C ₂ S	21,27	15,63	17,60			
C ₃ A	10,89	7,50	11,60			
C ₄ AF	7,33	12,39	8,20			
TM	2,34	1,33	2,27	Tonerdemodul		
SM	2,77	2,21	2,47	Silicatmodul		

hervor, dass die Druckfestigkeit im Alter von 2 Tagen nahezu unbeeinflusst von der Art des eingesetzten Hüttensandes war. So betrug die 2-Tage-Festigkeit bei den CEM II/B-S-Zementen 15 bzw. 17 MPa, bei den CEM III/B-Zementen etwa 10 MPa. Bei der 7- und 28-Tage-Festigkeit zeigte sich jedoch eine stärkere Abhängigkeit von der Hüttensandreaktivität. Hier konnten zwischen den Stoffkombinationen deutliche Festigkeitsunterschiede von 7 bis 10 MPa gemessen werden.

In **Bild III-20** werden Zemente dargestellt, die sich aus einem Hüttensand und drei unterschiedlichen Klinkern zusammensetzen. Bei den klinkerreichen CEM II/B-S-Zementen stellen sich deutliche Festigkeitsunterschiede und charakteristische Festigkeitsverläufe ein. Hier spiegeln sich vorrangig die unterschiedlichen Klinkereigenschaften wider. In jedem Prüfalter konnten Festigkeitsunterschiede von 5 bis 10 MPa ermittelt werden. Der dominierende Einfluss der Klinkerreaktivität auf die Druckfestigkeit von Portlandhüttenzementen ließ sich unter den hier beschriebenen

Bedingungen sehr gut anhand der Festigkeitsentwicklung von Portlandzementen abschätzen. Auf die Frühfestigkeit klinkerarmer Hochofenzemente hatte die Klinkerreaktivität jedoch kaum einen Einfluss, obgleich diese Zemente um 1000 cm²/g feiner gemahlen wurden. Aber auch die 28-Tage-Druckfestigkeit der CEM III/B-Zemente wurde von der Art des eingesetzten Klinkers nur geringfügig beeinflusst, so dass Festigkeitsunterschiede von maximal 3 MPa entstanden.

Einfluss von Zementhauptbestandteilen auf die Alkalität ■

Eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) kann durch die Verwendung von Zementen mit niedrigem wirksamem Alkaligehalt verhindert werden. Diese so genannten „NA-Zemente“ sind in Deutschland in der DIN 1164 genormt; die Einstufung erfolgt dabei auf Basis des Gesamtalkaligehalts. NA-Zemente

bewirken grundsätzlich eine Senkung des Alkaliangebots in der Porenlösung des Zementsteins (wirksamer Alkaligehalt) und damit auch eine entsprechende Absenkung des pH-Werts.

Während bei Portlandzementen der wirksame Alkaligehalt mit zunehmendem Gesamtalkaligehalt steigt, kann der wirksame Alkaligehalt von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen in unterschiedlichem Maße von deren Gesamtalkaligehalt abweichen. Die Ursache liegt einerseits in der unterschiedlichen Löslichkeit der in den Zementbestandteilen enthaltenen Alkalien sowie andererseits in der unterschiedlichen Alkaliaufnahme durch die Reaktionsprodukte. Die Regelung, NA-Zemente anhand ihres Gesamtalkaligehalts einzustufen, kann somit in einigen Fällen dazu führen, dass Zemente aufgrund ihres Gesamtalkaligehalts von der Nutzung als NA-Zemente ausgeschlossen werden, obwohl ihr wirksamer Alkaligehalt gering ist.

Untersuchungen

Um gegebenenfalls weitere Zemente als NA-Zement einzustufen zu können ist es erforderlich, deren wirksamen Alkaligehalt zu ermitteln und über lange Hydratationszeiten sicher voraussagen zu können. Insofern kommt den dynamischen Bindungs- und Lösungsprozessen der Alkalien im Zementstein eine besondere Bedeutung zu. Allerdings lagen bisher kaum ausreichende Erkenntnisse über diese Prozesse vor. Dies gilt in besonderem Maße für Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen.

Im Forschungsinstitut wurden daher Untersuchungen durchgeführt, in denen dem Einfluss verschiedener Hüttensande, Steinkohlenflugaschen und Silicastaube auf den wirksamen Alkaligehalt des Zements nachgegangen wurde. Anhand von Porenlösungsuntersuchungen wurde zunächst rein phänomenologisch geklärt, wie sich die Alkalität der Porenlösung von Zementsteinen durch den Einsatz der latent-hydraulischen bzw. puzzolanischen Zementhauptbestandteile verändert. Feststoffuntersuchungen sollten klären, welche chemisch-mineralogischen Mechanismen für die Alkalibindung entscheidend sind und ob bzw. wie lange sie im Zementstein stabil ist.

Einfluss der Hauptbestandteile auf die Alkalität der Porenlösung

Für die Untersuchungen wurden zunächst Zementsteine aus unterschiedlichen Zementen hergestellt, für die jeweils derselbe Klinker verwendet wurde. Weitere

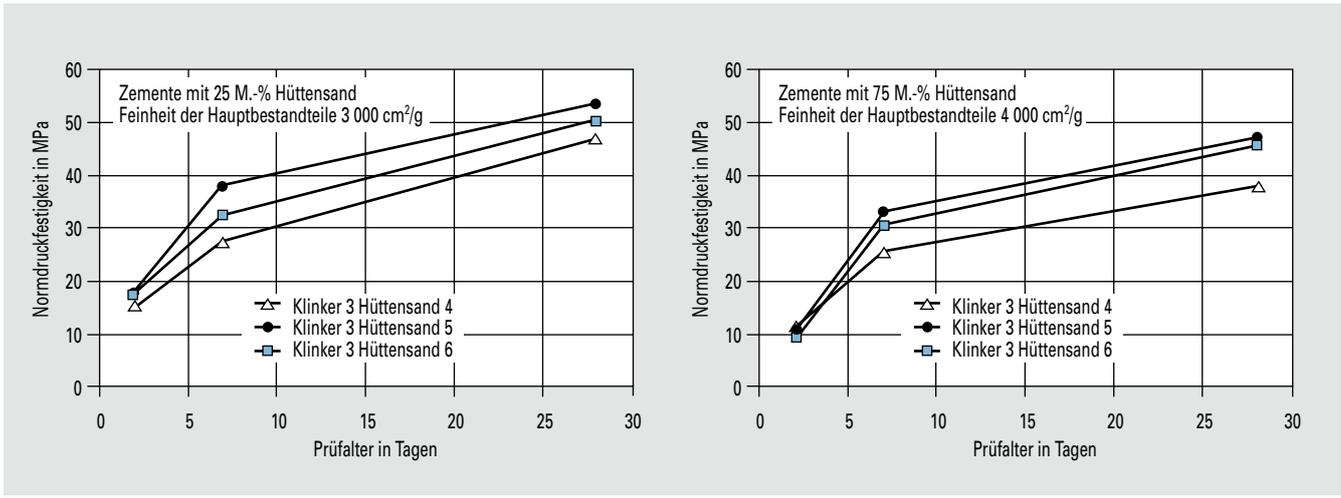


Bild III-19: Vergleich der Druckfestigkeit von CEM II/B-S- und CEM III/B-Zementen auf der Basis des gleichen Klinkers mit 3 verschiedenen Hüttensanden; gleiche Korngrößenverteilung der Hauptbestandteile

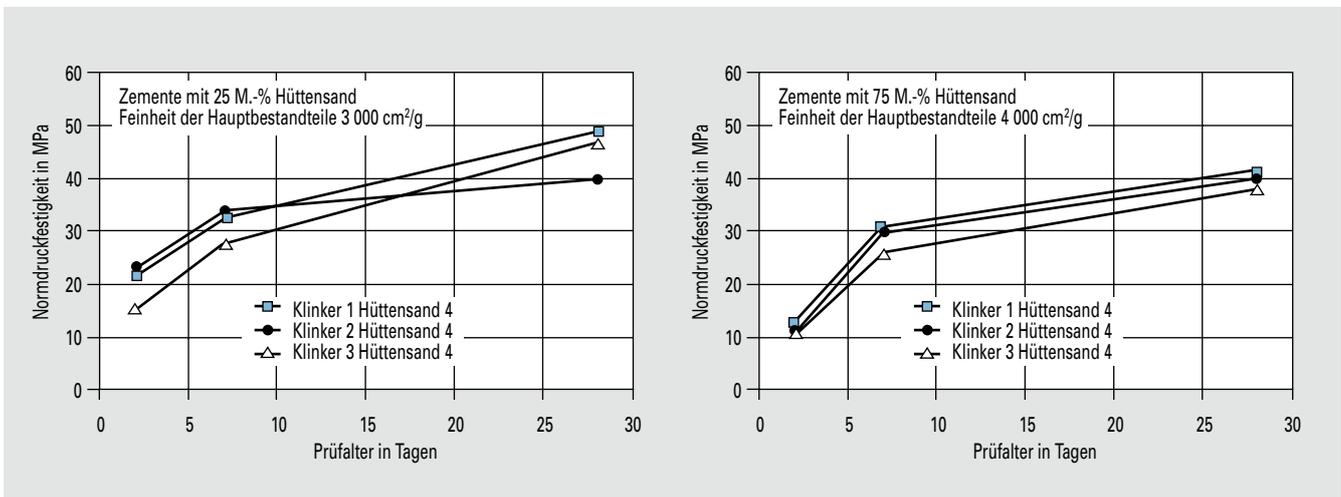
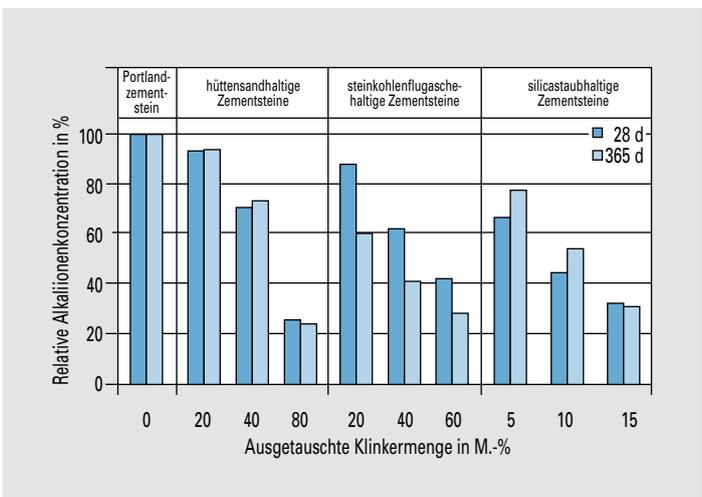


Bild III-20: Vergleich der Druckfestigkeit von CEM II/B-S- und CEM III/B-Zementen auf der Basis des gleichen Hüttensands mit 3 verschiedenen Klinkern; gleiche Korngrößenverteilung der Hauptbestandteile

Hauptbestandteile waren Hüttensand, Steinkohlenflugasche und Silicastaub. In **Bild III-21** ist die Alkaliionenkonzentration in der Porenlösung der Zementsteine dargestellt. Alle Konzentrationen wurden auf die Alkaliionenkonzentration im Portlandzementstein bezogen. Das Bild zeigt, dass unabhängig von dem verwendeten Hauptbestandteil ein Austausch des Klinkers zu einer Abnahme der Alkaliionenkonzentration führt. Die verschiedenen Zementbestandteile unterscheiden sich in ihrer Wirkungsweise jedoch deutlich.

In den hüttensandhaltigen Zementsteinen nimmt die Alkaliionenkonzentration nicht proportional zu der ausgetauschten Klinkermenge ab, vielmehr ist die Reduktion geringer. Ein Teil der in der Porenlösung enthaltenen Alkalien stammt somit aus den Hüttensanden. Im Vergleich zum Klinker ist der Anteil jedoch sehr gering. Er be-

Bild III-21: Veränderung der Alkaliionenkonzentration der Porenlösung durch Hüttensand, Steinkohlenflugasche und Silicastaub nach unterschiedlichen Hydratationszeiten



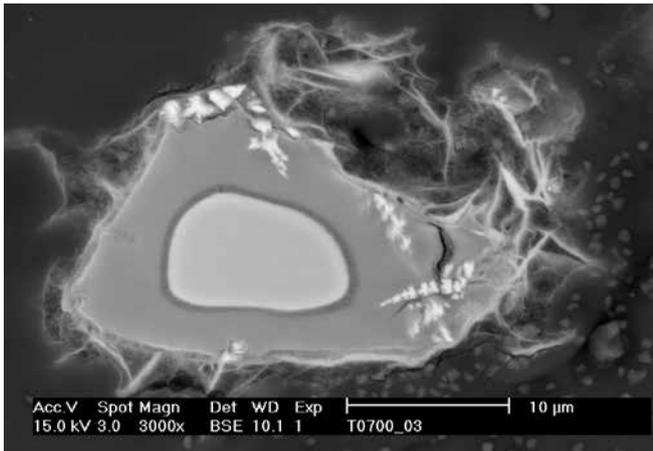


Bild III-22: Reaktionsprodukte eines in 10 mol Kalilauge gelagerten Hüttensands. Der unreagierte Kern des Hüttensandskorns ist umgeben von einer Schicht aus hydroalcalitähnlichen Phasen sowie aufgewachsenen CSH- und CASH-Phasen.

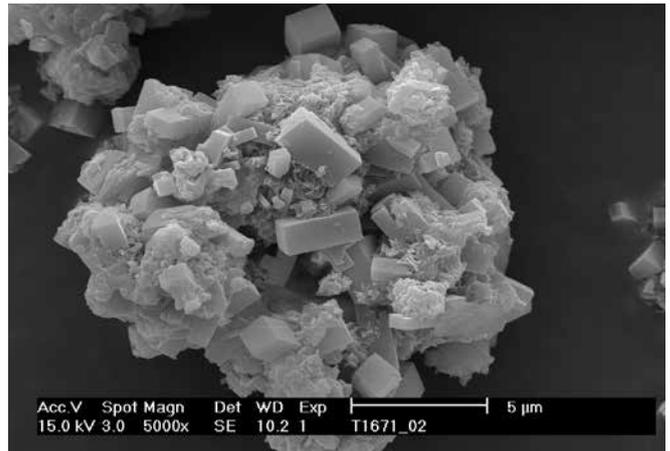


Bild III-23: Reaktionsprodukte einer in 10 mol Kalilauge gelagerten Flugasche. Die Flugaschekugel ist bedeckt mit kaliumhaltigen Alumosilicaten (Zeolithe).

wirkt jedoch, dass eine merkliche Verringerung der Alkaliionenkonzentration erst ab Hüttensandgehalten von mehr als 20 M.-% festzustellen ist. In die Untersuchungen wurden drei Hüttensande mit Alkaligehalten von 0,54 M.-% $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Aqu}}$ bis 1,23 M.-% $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Aqu}}$ einbezogen. Die Untersuchungen ergaben, dass alle Hüttensande einen ähnlichen Beitrag zum Alkaligehalt der Porenlösung liefern. Entscheidend für den wirksamen Alkaligehalt des Zements ist demnach der Alkaligehalt des Klinkers und nicht der des Hüttensands.

Der Einsatz von Flugasche im Zement hat bis zu einer Hydratationsdauer von 28 Tagen einen vergleichbaren Einfluss auf die Alkalität der Porenlösung wie der Einsatz von Hüttensanden. Zwischen 28 und 365 Tagen setzt jedoch eine deutliche Verminderung der Alkaliionenkonzentration ein. Nach 365 Tagen ist die Alkalität der Porenlösung geringer, als es allein aufgrund der verringerten Klinkermenge zu erwarten wäre. Es werden demnach auch Alkalien, die bei der Reaktion des Klinkers freigesetzt werden, in den Reaktionsprodukten aufgenommen.

Eine überproportional starke Abnahme der Alkaliionenkonzentration erfolgt bei Einsatz von Silicastaub. So führt der Austausch von 15 M.-% des Klinkers gegen Silicastaub zu einer Verringerung der Alkaliionenkonzentration auf etwa $\frac{1}{3}$ der Konzentration in der Porenlösung des Portlandzementsteins. In allen silicastaubhaltigen Zementsteinen ist mit fortschreitender Hydratationsdauer eine Zunahme der Alkaliionenkonzentration in der Porenlösung festzustellen. Die Freisetzung beginnt dabei umso früher und ist umso stärker ausgeprägt, je geringer der

Silicastaubgehalt im Zementstein ist. So beginnt die Freisetzung von Alkalien in dem Zementstein, der 5 M.-% Silicastaub enthält, bereits nach 2 Tagen. Dagegen fällt die Alkaliionenkonzentration in dem Zementstein, der 15 M.-% Silicastaub enthält, bis zu einer Hydratationsdauer von 91 Tagen kontinuierlich ab. Eine Freisetzung von Alkalien ist erst bei längeren Hydratationszeiten festzustellen.

Ursachen für die Alkalibindung

Um zu beurteilen, durch welche Prozesse der Alkalihaushalt beeinflusst wird, wurde die Bindung der Alkalien in den verschiedenen Zementsteinen untersucht. Generell können Alkalien durch die CSH-Phasen sorbiert werden. Diese Phasen machen den größten Anteil der Feststoffphase im erhärteten Zementstein aus. Sie stellen somit den wichtigsten Bindungspartner für die Alkalien dar. Die Bindungskapazität der CSH-Phasen verändert sich jedoch mit ihrer stöchiometrischen Zusammensetzung. Mit sinkendem Calciumgehalt in den Phasen steigt die Tendenz, Alkalien zu sorbieren. Die calciumreichsten CSH-Phasen werden bei der Reaktion des Portlandzementklinkers gebildet. Bei Ersatz des Klinkers durch die calciumärmeren latent-hydraulischen bzw. puzzolanischen Hauptbestandteile sinkt das mittlere Ca/Si-Verhältnis der CSH-Phasen im Zementstein. Wie stark das Ca/Si-Verhältnis im Durchschnitt gesenkt wird, hängt dabei vom Calciumgehalt der weiteren Hauptbestandteile außer Klinker sowie deren Anteil im Zement ab.

Es wurden Untersuchungen durchgeführt, die zeigen sollten, ob die Alkalibindung ausschließlich auf die CSH-Phasen be-

schränkt ist, oder ob auch andere alkali-bindende Phasen gebildet werden. Hierzu wurde analysiert, welche Reaktionsprodukte bei der Reaktion der Hüttensande und Puzzolane in reinen Alkalilaugen sowie in Alkalilaugen unter Zusatz von 30 M.-% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ gebildet werden.

Unabhängig von der verwendeten Lösung werden bei der Hüttensandreaktion neben CSH-Phasen, CASH-Phasen (A = Aluminium) und hydroalcalitähnliche Reaktionsprodukte (Mg-Al-Verbindungen) gebildet. **Bild III-22** zeigt den Anschlag eines Hüttensandskorns, dessen unreaktierter Kern mit einer Hülle aus hydroalcalitähnlichen Phasen in dem Bereich des ursprünglichen Hüttensandskorns und aufgewachsenen CSH- bzw. CASH-Phasen umgeben ist. Untersuchungen an synthetisch hergestellten Hydroalcaliten zeigten, dass diese Phasen für die Alkalibindung keine Bedeutung haben. Somit ist die Alkalibindung in hüttensandhaltigen Zementsteinen ebenso wie in Portlandzementsteinen auf eine Sorption an den CSH- oder CASH-Phasen beschränkt.

In hüttensandhaltigen Zementsteinen mit Hüttensandgehalten von bis zu 40 M.-% ist das Ca/Si-Verhältnis der CSH-Phasen ähnlich beschaffen wie im Portlandzement, d.h. in diesen Zementsteinen ist auch die Bindungskapazität für die Alkalien nicht höher als im Portlandzementstein. Somit ist die Abnahme der Alkaliionenkonzentration in der Porenlösung der hüttensandhaltigen Zementsteine vorwiegend auf die sinkende Klinkermenge und damit auf eine geringere Alkalifreisetzung aus den Ausgangsstoffen zurückzuführen. Bei Hüttensandgehalten bis zu 20 M.-% führt dies dazu, dass sich

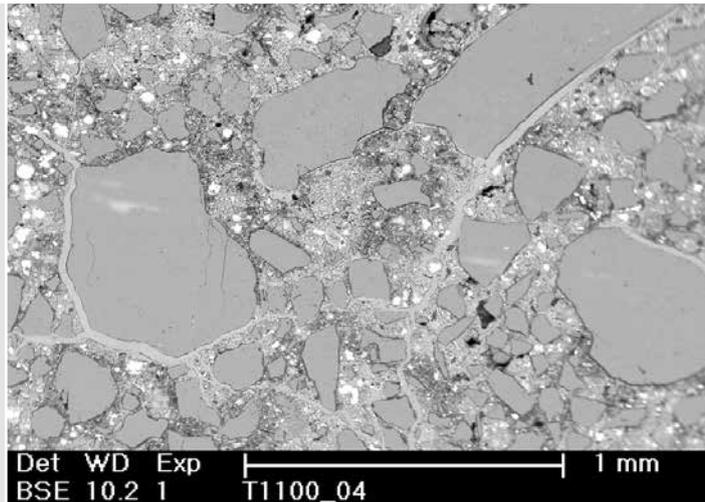
durch den Beitrag des Hüttensands zum Alkaligehalt der Porenlösung die Alkaliionenkonzentration im Vergleich zum Portlandzementstein nur wenig verringert. Erst bei Hüttensandgehalten von mehr als 40 M.-% nimmt die Bindungskapazität der CSH-Phasen zu. Dem steht eine geringere Menge an CSH-Phasen gegenüber, so dass insgesamt auch hierbei die Einbindung von Alkalien nicht überproportional ansteigt.

Auch in silicastaubhaltigen Zementsteinen ist die Alkalibindung ausschließlich auf die Sorption an den CSH-Phasen beschränkt. Das frühe Einsetzen der Alkalibindung wird durch die schnelle Reaktion des Silicastaubs mit den in der Porenlösung gelösten Alkalien hervorgerufen. Dabei bildet sich zunächst ein Alkali-Kiesel-Gel, das eine hohe Affinität zu Alkalien aufweist. Im weiteren Verlauf der Hydratation kann dieses Gel mit dem bei der Hydratation des Klinkers abgespaltenen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zu CSH-Phasen umgesetzt werden. Bei der Umsetzung werden Alkalien freigesetzt. Diese Reaktion kann langfristig zu einem Anstieg der Alkaliionenkonzentration in der Porenlösung führen. Die alkalibindende Wirkung ist somit zeitlich begrenzt.

Bei Verwendung von Flugasche treten zwei Effekte auf, durch die eine Alkalibindung begünstigt wird. Bei der Reaktion der Flugasche, die nach einer Hydratationsdauer von etwa 28 Tagen beginnt, werden zum einen calciumarme CSH- und CASH-Phasen gebildet, die verstärkt Alkalien sorbieren können. Zum anderen können bei der Auflösung des Flugascheglasses alkalihaltige Aluminosilicate, so genannte Zeolithe, gebildet werden (Bild III-23). Die Stabilität dieser Phasen hängt von der Verfügbarkeit des Calciums ab. So waren bei Flugaschen, die unter gleichzeitigem oder nachträglichem Zusatz von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ gelagert wurden, zeolithische Phasen nur in geringem Umfang nachzuweisen. Statt dessen wurden CSH- und CASH-Phasen als wichtigste Reaktionsprodukte nachgewiesen.

Für die Alkalibindung in flugaschehaltigen Zementsteinen ist daher der folgende Reaktionsmechanismus denkbar: Das gelöste Flugascheglas reagiert zunächst mit den unmittelbar verfügbaren Alkalien aus der Porenlösung unter der Bildung alkalihaltiger Zeolithe. Bei Zutritt von Calcium werden die zeolithischen Verbindungen in CSH- bzw. CASH-Phasen umgesetzt. Ob dieser Prozess zu einem Wiederanstieg des gelösten Alkalianteils führt, hängt von der Menge und Stöchiometrie der gebildeten Phasen ab.

Bild III-24: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Mörtelanschliffs. Der Prüfmörtel aus einem CEM I-HS mit $w/z = 0,60$ wurde 1 Jahr bei 8°C in 4,4 %iger Natriumsulfatlösung gelagert. Quer durch das Gefüge und speziell um Zuschlagkörner verlaufen mit Gips gefüllte Risse.



Die Untersuchungen zeigen, dass die zeolithische Alkalibindung mit zunehmendem Flugascheanteil im Zement an Bedeutung gewinnt, da durch die sinkende Klinkermenge das $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Angebot sinkt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass auch bei Zementen mit geringem Flugaschegehalt der Umsetzungsprozess der Zeolithe zu CSH-Phasen bei langen Hydratationszeiten sehr langsam verläuft, da die Diffusionsgeschwindigkeit des Calciums durch die zunehmende Verdichtung der Porenstruktur verlangsamt wird.

Sulfatwiderstand ■

Die Betonnorm DIN 1045-2 sieht vor, dass bei einem Sulfatangriff bis $1500\text{ mg SO}_4/\text{l}$ anstelle eines HS-Portland- oder HS-Hochofenzements auch bestimmte Mischungen aus Zement und Flugasche verwendet werden dürfen. Beispielsweise lassen sich Gemische aus 80 M.-% CEM I oder 80 M.-% CEM II/A-LL und 20 M.-% Steinkohlenflugasche einsetzen. Bei Laboruntersuchungen zum Sulfatwiderstand wurde in der Vergangenheit jedoch des Öfteren festgestellt, dass Mörtelproben auf Basis solcher flugaschehaltiger Gemische, insbesondere bei Temperaturen unter 10°C , keinen ausreichenden Sulfatwiderstand aufwiesen. Der im Labor mit Natriumsulfatlösung erfolgte Sulfatangriff führte zu massiven Treibschäden, zum Teil mit nachfolgender Thaumasilbildung. Diesen Beobachtungen stehen die Erfahrungen aus der Baupraxis gegenüber, wonach bei Betonen nahezu keine Schäden bekannt sind.

Extreme und praxisnahe Prüfbedingungen

Während der letzten Jahre wurde deshalb der Sulfatwiderstand von Zement/Flugasche-Gemischen gezielt unter verschiedenen Laborbedingungen untersucht. Dabei wurde zwischen extremen Prüfbedingungen und praxisnahen Prüfbedingungen unterschieden. Extreme Prüfbedingungen bedeuten sehr hohe Sulfatkonzentrationen (z. B. 30 g/l) in der Prüflösung sowie hohe Wasser/Zement-Werte (z. B. $0,60$) für die Prüfmörtel. Diese Bedingungen werden in Schnellprüfverfahren genutzt, zu denen hierzulande das Verfahren des Sachverständigenausschusses (SVA-Verfahren) und das Wittekindt-Verfahren gehören. In der Praxis sind derartige Sulfatkonzentrationen jedoch kaum zu finden.

Durch die hohe Sulfatkonzentration beim Schnellprüfverfahren kann es zu Dehnungen der Prüfkörper kommen, die nicht mit dem Verhalten in der Praxis übereinstimmen. In diesen Fällen liegt der Dehnung unter Prüfbedingungen die Bildung von sekundärem Gips und nicht von sekundärem Ettringit zugrunde (siehe Bild III-24). Die Sulfationen reagieren mit dem bei der Hydratation von Calciumsilicaten entstehenden Calciumhydroxid. Sowohl Laboruntersuchungen als auch thermodynamische Berechnungen zeigen, dass diese Reaktion nur bei einer ausreichend hohen Sulfatkonzentration von mehreren tausend mg/l stattfindet. Bei Sulfatkonzentrationen von bis zu 1500 mg/l findet eine Gipsbildung hingegen gar nicht und bei Konzentrationen bis 3000 mg/l nur in geringem Maße statt.

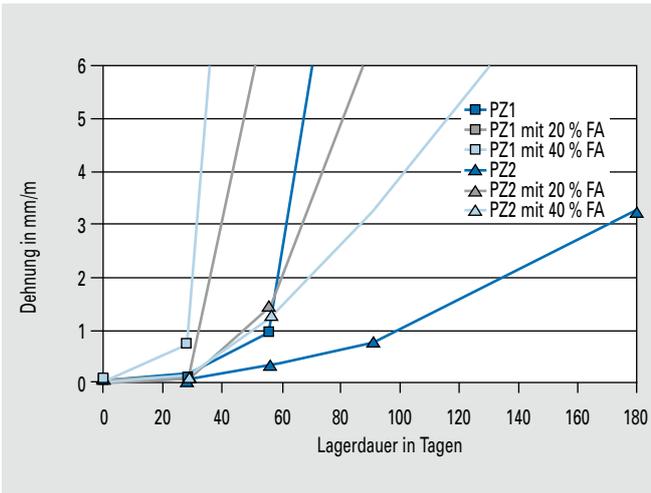


Bild III-25: Dehnungsverhalten von Mörtelfachprismen, geprüft nach dem Wittekindt-Verfahren mit 4,4 % iger Natriumsulfatlösung und Lagerung bei 8 °C. PZ1 ist ein CEM I 32,5 R mit 11 M.-% C₃A und PZ2 mit 8 M.-% C₃A. Die Flugasche wurde mit k = 1 auf den Wasser/Zement-Wert angerechnet.

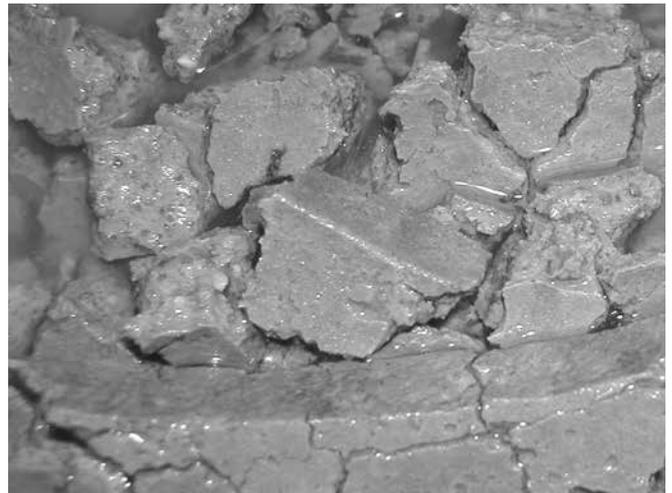


Bild III-26: Mörtelfachprismen aus einem Bindemittelgemisch mit 80 M.-% CEM I 32,5 R und 20 M.-% SFA (w/z = 0,60, k = 1) nach 3 Monaten Lagerung in 4,4 % iger Natriumsulfatlösung bei 8 °C



Bild III-27: Mörtelfachprisma aus einem Bindemittelgemisch mit 80 M.-% CEM I 32,5 R und 20 M.-% SFA (w/z = 0,60, k = 1) nach 18 Monaten Lagerung in 0,22 % iger Natriumsulfatlösung bei 8 °C

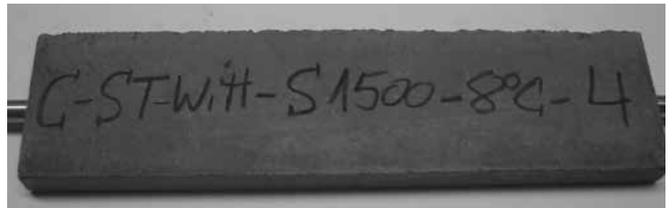


Bild III-28: Mörtelfachprisma aus einem Bindemittelgemisch mit 60 M.-% CEM I 32,5 R und 40 M.-% SFA (w/z = 0,60, k = 1) nach 18 Monaten Lagerung in 0,22 % iger Natriumsulfatlösung bei 8 °C

Flugaschehaltige Prüfmörtel

Eine hohe Sulfatkonzentration in Kombination mit einer niedrigen Temperatur wirkt sich insbesondere bei Zement/Flugasche-Gemischen ungünstig auf den Sulfatwiderstand aus. Die Mörtelfachprismen dehnen sich zumeist schon nach wenigen Tagen stark (Bild III-25) und zerfallen oftmals innerhalb von 2 oder 3 Monaten (Bild III-26). Je höher der Flugaschegehalt, desto ausgeprägter ist dieser Effekt. Wird hingegen mit einer Sulfatkonzentration von 1 500 mg/l oder 3 000 mg/l geprüft, so steigt der Sulfatwiderstand mit steigendem Flugascheanteil an (Bild III-27 und Bild III-28). Dieses Verhalten zeigt sich unabhängig davon, ob für die Mörtelherstellung ein Wasser/Zement-Wert von 0,60 oder 0,50 und für die Flugasche ein Anrechnungsfaktor von k = 1 oder k = 0,4 gewählt wurde.

Das Verhalten lässt sich folgendermaßen erklären: Bei niedriger Temperatur ist die puzzolanische Reaktion der Flugasche und damit die für ein dichtes Gefüge erforderliche Bildung von Hydratphasen verlangsamt. Der Diffusionswiderstand ist nicht

hoch, und Sulfationen dringen ins Gefügebinnere ein. Dort können sie vorwiegend mit den Aluminatphasen des Zements zu sekundärem Ettringit und mit Calciumhydroxid zu sekundärem Gips, den zwei treibend wirkenden Phasen, reagieren. Da die Diffusion jedoch auch konzentrationsabhängig ist, gelangen bei einer höheren Sulfatkonzentration mehr Sulfationen ins Gefüge als bei einer niedrigen. Eine derart verstärkte Treibphasenbildung führt zu einer beschleunigten Schädigung des Gefüges. Je höher der Flugascheanteil ist, desto ausgeprägter ist dieses Verhalten.

Bei einer niedrigen Sulfatkonzentration (z. B. 1 500 mg/l) kommt es zum einen nicht zur Bildung von sekundärem Gips, und zum anderen ist die Diffusion von Sulfationen aufgrund des geringen Konzentrationsgefälles deutlich verringert. Es entsteht weniger treibend wirkender sekundärer Ettringit. Die zwar langsam ablaufende, aber zur Erhöhung des Diffusionswiderstandes beitragende puzzolanische Reaktion der Flugasche kommt zur Geltung und führt zu einem erhöhten Sulfatwiderstand. Auch hier gilt: Je höher

der Flugaschegehalt, desto ausgeprägter das beschriebene Verhalten.

Physikalischer und chemischer Sulfatwiderstand

Im Unterschied zu HS-Portlandzementen haben Zement/Flugasche-Gemische jedoch keinen chemischen Widerstand gegenüber einer sekundären Ettringitbildung. Der hohe Sulfatwiderstand erklärt sich allein über einen erhöhten physikalischen Sulfatwiderstand. Ähnlich wie bei Hochofenzementen bilden sich bei der Hydratation von flugaschehaltigen Zementen Phasen, die den Diffusionswiderstand des Gefüges erhöhen. Da der Diffusionswiderstand im Allgemeinen von der Porosität des Gefüges abhängt, haben auch der Wasser/Zement-Wert und der Anrechnungsfaktor k der Flugasche einen maßgeblichen Einfluss auf den Sulfatwiderstand. In Bild III-27 ist an einem Mörtelfachprisma beispielhaft zu sehen, dass bei einem Wasser/Zement-Wert von 0,60 und einem Anrechnungsfaktor von k = 1 schon nach einigen Monaten Schädigungen an Ecken und Kanten auftraten, die auf Treibphasenbildung zurückzuführen sind. Im Vergleich dazu zeigten Mörtelfach-

prismen mit einem Wasser/Zement-Wert von 0,50 und $k = 0,4$ einen viel höheren Sulfatwiderstand. Auch nach 18 Monaten Sulfatangriff waren nahezu keine Schädigungen zu erkennen (Bild III-29).

Thaumasitbildung

Neben den Gemischen aus Portlandzement und Flugasche galt den Gemischen aus Portlandkalksteinzement und Flugasche besonderes Interesse. Aufgrund des Kalksteinanteils wurden bei Laborprüfungen nicht nur Treibschäden, sondern auch massive Gefügeentfestigungen durch Thaumasitbildung vorgefunden. Dabei konnten zwei Abhängigkeiten beobachtet werden: Je höher der Flugascheanteil war, desto weniger Thaumasit bildete sich, und je stärker eine anfängliche Treibschädigung war, desto intensiver war auch die Thaumasitbildung. Ohne Treibschädigung fand praktisch keine Thaumasitbildung statt. Dieses Verhalten kann auf zwei Ursachen zurückgeführt werden: Zum einen kann sich Thaumasit bevorzugt durch Umlagerung aus Ettringit bilden, dem „indirekten“ Bildungsweg. Zum anderen wird durch eine Treibschädigung die für den Sulfatangriff zugängliche Oberfläche vergrößert, so dass eine Thaumasitbildung in verstärktem Umfang stattfinden kann.

Bild III-30 zeigt die Oberfläche eines Mörtelprismas auf Basis eines Portlandkalksteinzement/Flugasche-Gemischs. Das Gefüge ist stellenweise durch Thaumasitbildung entfestigt, erkennbar am weißen Reaktionsprodukt auf dem ansonsten grauen Gefüge. Thaumasit von diesem Prisma ist in Bild III-31 in hoher Vergrößerung dargestellt. Die Kristalle haben die gleiche nadelförmige, hexagonal-prismatische Morphologie wie bei Ettringit. Die chemische Zusammensetzung zeigt jedoch das Vorhandensein von Kohlenstoff und von Silicium anstelle von Aluminium und erlaubt dadurch eine eindeutige Zuordnung.

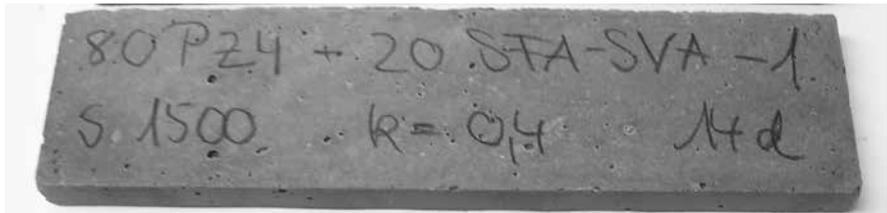


Bild III-29: Mörtelflachprisma aus einem Bindemittelgemisch mit 80 M.-% CEM I 32,5 R und 20 M.-% SFA ($w/z = 0,50$, $k = 0,4$) nach 18 Monaten Lagerung in 0,22 %iger Natriumsulfatlösung bei 8 °C



Bild III-30: Mörtel mit oberflächlicher Entfestigung, nach 2-jähriger Lagerung in 0,22 %iger Natriumsulfatlösung bei 8 °C; weiße Bereiche zeigen die Bildung von Thaumasit

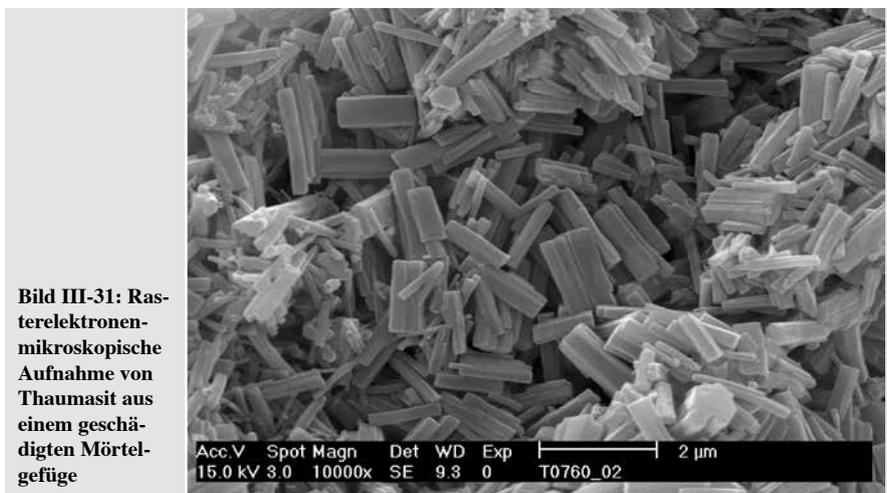


Bild III-31: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Thaumasit aus einem geschädigten Mörtelgefüge

Prüfverfahren

Die Auswertung der zahlreichen Versuchsergebnisse, die während der letzten Jahre am Forschungsinstitut erzielt wurden, ergibt folgendes Bild der Prüfverfahren: Die Schnellprüfverfahren sind zwar geeignet, unterschiedliche Portlandzemente anhand ihres chemischen Sulfatwiderstands zu differenzieren. Für Zement/Flugasche-Gemische sind belastbare Aussagen zum Sulfatwiderstand bei niedriger Temperatur mit den Schnellprüfverfahren jedoch nicht zu erwarten, denn bei den flugaschehaltigen Zementen kommt es nicht allein auf den chemischen Sulfatwiderstand an.

Derzeit gibt es kein Prüfverfahren, das insbesondere für Zement/Flugasche-Gemische innerhalb eines Prüfzeitraums von nur wenigen Wochen eine eindeutige und damit sichere Beurteilung des Sulfatwiderstandsverhaltens ermöglicht. Die Schwächen der Prüfverfahren zeigen sich auch darin, dass es bisher weder auf nationaler noch auf europäischer Ebene möglich war, ein normfähiges Prüfverfahren zu entwickeln. Vor diesem Hintergrund wird das Thema Prüfverfahren dennoch weiterhin von einer Expertengruppe des DAfStb erörtert. Dabei sollen auch die neueren Erkenntnisse Berücksichtigung finden.

Chromat – Analytik und Langzeitstabilität von Chromatreduzieren ■

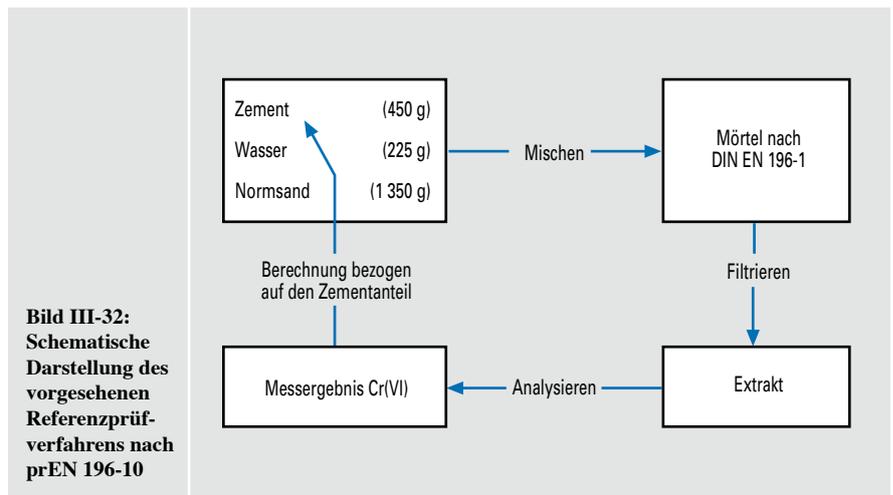
Alle Zementhersteller und Hersteller von zementhaltigen Zubereitungen müssen ab dem 17.01.2005 die Anforderungen der Europäischen Chromatrichtlinie 2003/53/EC erfüllen. Danach darf ein Zement oder eine zementhaltige Zubereitung bezogen auf die Masse trockenen Zements nicht mehr als 0,0002 % (entspricht 2 ppm) wasserlöslichen Chromats enthalten. Für die Bestimmung dieses wasserlöslichen Chromats muss ein harmonisiertes europäisches Prüfverfahren vorliegen.

Das CEN/TC 51 wurde von der Europäischen Kommission mit der Entwicklung einer europäischen Prüfnorm zur Bestimmung wasserlöslichen Chromats in Zementen und zementhaltigen Zubereitungen beauftragt. Die mit dieser Aufgabe betraute Task Group CEN/TC 51/WG 15/TG 2 hat nach nur 18 Monaten intensiver Arbeit einen Normentwurf vorgelegt.

Mit einer endgültigen Verabschiedung als EN 196-10 ist allerdings nicht vor Ende 2005 zu rechnen. Bis dahin empfiehlt die Europäische Kommission, den vorliegenden Normentwurf schon zur Grundlage der Bestimmung wasserlöslichen Chromats in Zementen und zementhaltigen Zubereitungen zu machen.

Europäisches Chromatprüfverfahren

Nach eingehender Diskussion der in Europa bereits eingeführten nationalen Verfahren zur Bestimmung von wasserlöslichem Chromat in Zement hat die TG 2 das Konzept für ein europaweit harmonisiertes Prüfverfahren erarbeitet. Danach sollen die Freisetzungsszenarien für Chromat aus zementhaltigen Zubereitungen unter Berücksichtigung der Anwendungen in der Praxis möglichst gut nachgebildet werden. Für die Bestimmung von Chromat sollte Zement demnach in seinen Anwendungsformen Mörtel, Beton und anderen zementhaltigen Zubereitungen geprüft werden. Konsequenterweise sieht die neue Prüfnorm vor, die Prüfung an einem Mörtel entsprechend DIN EN 196-1 durchzuführen. Von daher entspricht der Wasser/Zement-Wert ($w/z = 0,5$) bei diesem Extraktionsverfahren der Praxis der Zementanwendung, anders als dies etwa beim Verfahren nach TRGS 613 ($w/z = 4$) der Fall ist. Das wasserlösliche Chromat wird im wässrigen Filtrat des Mörtels prinzipiell ähnlich wie in der in Deutschland angewendeten, im Anhang



der TRGS 613 beschriebenen Prüfvorschrift bestimmt (Bild III-32). Der Einsatz von elementarem Brom zur Berücksichtigung reduzierender Stoffe soll durch eine optimierte Analyseprozedur vermieden werden.

Den wasserlöslichen Chromatanteil eines Zementes durch Herstellung eines Normmörtels nach EN 196-1 zu extrahieren ermöglicht die korrekte Beschreibung der Expositionssituation bei der Zementanwendung für den Fall, dass trotz der empfohlenen Schutzmaßnahmen ein Hautkontakt mit dem zementhaltigen Produkt nach Wasserzugabe erfolgt. Der Zement kann nur so im Hinblick auf seinen wasserlöslichen Chromatgehalt praxisnah, d. h. richtig und fair, beurteilt werden.

Zementhaltige Zubereitungen

Der wasserlösliche Chromatgehalt in zementhaltigen Zubereitungen wird in ähnlicher Weise bestimmt, wie dieses bei Zementen der Fall ist. Danach werden Zubereitungen zunächst in Wasser suspendiert und anschließend filtriert. Im wässrigen Extrakt wird dann das gelöste Chromat bestimmt. Für die Gewinnung einer ausreichenden Menge Filtrats für die chemische Analyse des wasserlöslichen Chromats können zementhaltige Zubereitungen nach Wasserzugabe noch zu trocken sein. Der Wasser/Zement-Wert ist in solchen Fällen soweit zu erhöhen, wie es für die Gewinnung einer ausreichenden Filtratmenge erforderlich ist.

Allerdings weisen die gewonnenen Extrakte aus zementhaltigen Zubereitungen nicht selten milchige Trübungen auf, die die Analyse nach prEN 196-10 erheblich stören oder gar unmöglich machen können. In einem Anhang zur prEN 196-10 sind Empfehlungen für die Analyse zementhaltiger Zubereitungen zusammengestellt.

Verbesserung des Prüfverfahrens möglich

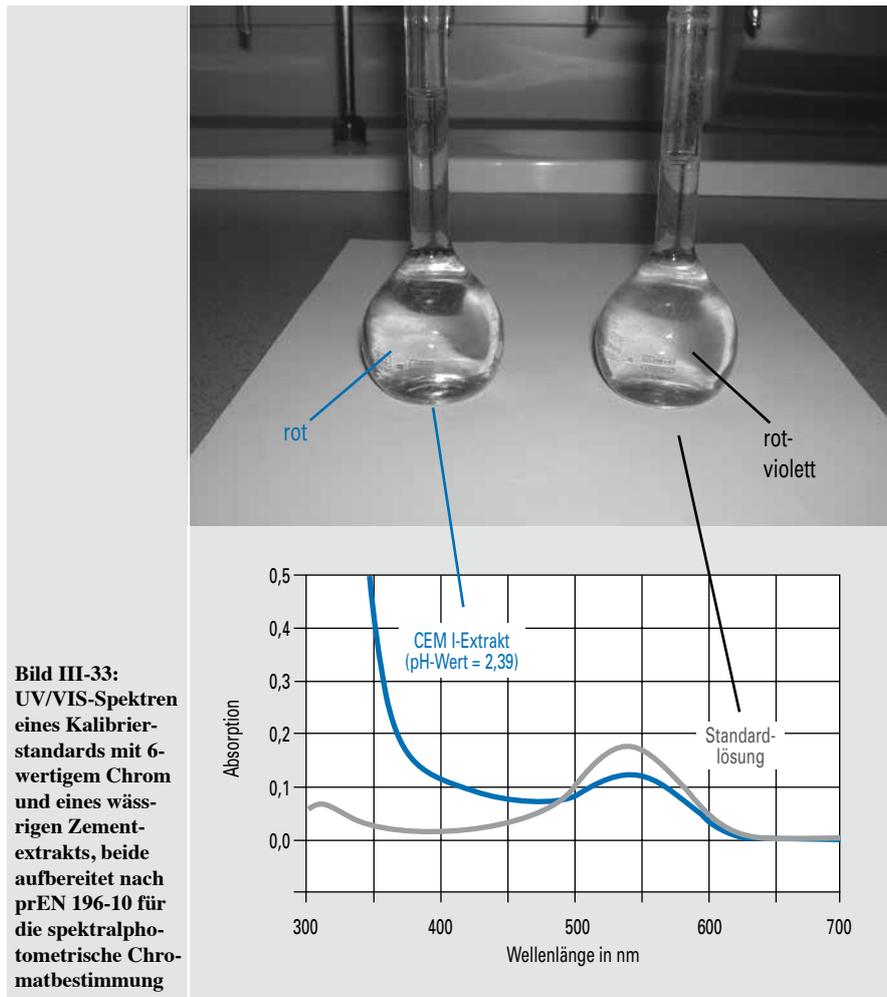
Nach dem neuen europäischen Prüfverfahren prEN 196-10 für wasserlösliches Chromat in Zementen und zementhaltigen Zubereitungen erfolgt die Bestimmung des wasserlöslichen Chromats mit dem so genannten Diphenylcarbazid-Verfahren (DPC-Verfahren). Diphenylcarbazid wird durch das gelöste Chromat zu Diphenylcarbazon oxidiert. Das 6-wertige Chrom [Cr(VI)] im Chromat wird dabei zu 3-wertigem Chrom [Cr(III)] reduziert. Diphenylcarbazon und Cr(III) verbinden sich zu einem intensiv rot-violetten Komplex [DPC-Cr(III)], dessen Konzentration spektralphotometrisch bestimmt wird. Zur Bildung dieses Komplexes ist die Absenkung des pH-Werts in den Bereich von 1 bis 2 erforderlich. Durch diese pH-Wert-Absenkung erhöht sich aber die Oxidationskraft des 6-wertigen Chroms. Oxidierbare Verbindungen können also erst bei diesen für die chemische Analyse verringerten pH-Werten den Chromatgehalt der Analyselösung verringern. Das würde zu Minderbefunden führen. Deshalb müssen solche oxidierbaren Verbindungen bereits vor der Absenkung des pH-Wertes oxidiert werden. In der deutschen (TRGS 613) oder der dänischen Analysevorschrift (DS 1020) wird dies durch Kochen der Analyseprobe mit Bromwasser erreicht.

In vielen Ländern ist der Umgang mit dem giftigen elementaren Brom unbeliebt oder gar verboten bzw. nur eingeschränkt erlaubt. Die Verwendung eines Oxidationsschritts soll in der Analysevorschrift der prEN 196-10 durch die Zugabe des Diphenylcarbazids vor dem Ansäuern und die genaue Einstellung des pH-Werts der Analyseprobe auf 2,1 bis 2,5 umgangen werden.

Oxidation ist erforderlich und hilfreich

Vergleichsuntersuchungen zur Chromatbestimmung nach der prEN 196-10 (ohne Oxidation) an verschiedenen europäischen Zementen ergaben unerwartete Ergebnisse. Die Analyseergebnisse teilten die beteiligten Laboratorien in zwei Gruppen: Eine Gruppe bestimmte auf etwa gleichem Niveau höhere Ergebnisse, die andere ebenfalls auf sehr einheitlichem Niveau tiefere Ergebnisse. Wenn die Laboratorien die Analyse mit Oxidation durchführten, lagen alle Ergebnisse auf dem höheren Niveau. Ausreißerergebnisse gab es dabei in allen Fällen. Bei einigen Laboratorien macht der Einsatz von Oxidationsmitteln danach kaum einen Unterschied, bei anderen jedoch einen deutlichen.

Im Forschungsinstitut der Zementindustrie wurde nach einer Erklärung für dieses Phänomen gesucht. Dabei wurde beobachtet, dass nicht alle nach prEN 196-10 aufbereiteten Zementextrakte (pH = 2,1-2,5) die typische rot-violette Farbe des DPC-Cr(III)-Komplexes aufwiesen. In manchen Fällen lag statt der rot-violetten eine rote Messlösung vor. Zur Überprüfung dieser Feststellung nach Augenschein wurden die UV/VIS-Spektren einer reinen Chromatlösung und eines Zementextrakts – beide nach prEN 196-10 aufbereitet – miteinander verglichen (Bild III-33). In der Chromatlösung absorbiert nur der erwartete DPC-Cr(III)-Komplex mit einem Absorptionsmaximum bei einer Wellenlänge von etwa 540 nm. Dagegen absorbiert bei dem aufbereiteten Zementextrakt zusätzlich eine Lösungskomponente mit einem Absorptionsmaximum bei einer Wellenlänge unterhalb von 350 nm (ergibt gelbliche Farbe). Wenn z. B. ein anderes Kation als Cr(III) mit dem Diphenylcarbazon diesen gelbfarbenen Komplex bildet, so geht dies zu Lasten der Konzentration des DPC-Cr(III)-Komplexes. Die Konsequenz wäre ein Minderbefund (s.o.) für das 6-wertige Chrom. Für ein und dasselbe Extrakt lässt sich die Entstehung einer solchen zusätzlichen Gelbfärbung nicht in allen Messlösungen sicher reproduzieren. Möglicherweise sind geringste Variationen in der Analyseprozedur nach prEN 196-10 schon geeignet, diese zusätzliche Gelbfärbung zu erzeugen. Chromatanalysen, bei denen der pH-Wert unter 2 lag, zeigten solche konkurrierenden, farbbeeinflussenden Reaktionen nicht. Für ein Absenken des pH-Wertes unter 2 ist allerdings ein vorheriger Oxidationsschritt erforderlich. Diese Beobachtungen können die Erklärung für die zwei Gruppen von Ergebnissen bei den internationalen Vergleichsuntersuchungen



(s.o.) zum wasserlöslichen Chromatanteil in verschiedenen europäischen Zementen sein.

Chromatbestimmung in zementhaltigen Zubereitungen

Die Durchführung eines Oxidationsschritts vor dem Absenken des pH-Wertes für die Chromatanalyse hat auch bei der Untersuchung von zementhaltigen Zubereitungen Vorteile. Bei Fliesenklebern, Spachtelmasen und manchen anderen zementhaltigen Zubereitungen sind die wässrigen Extrakte milchig eingetrübt. Diese Trübungen sind auf organische Zusätze zurückzuführen und lassen sich – wenn überhaupt – nur mit erheblichem präparativem Aufwand beseitigen. Für die Chromatanalyse ist aber eine absolut klare Analyseprobe erforderlich, denn die Trübung führt zu unspezifischer Absorption bei der spektralphotometrischen Messung und damit zu einem zu hohen Analyseergebnis. Wird der Extrakt aber zuvor mit einem geeigneten Oxidationsmittel erhitzt, so werden die organischen Zusätze derart verändert, dass sie sich leicht filtrieren oder dekantieren lassen. Die Trübungen stellen dann kein Problem mehr dar.

Ökonomische Produktionskontrolle

Die prEN 196-10 stellt eine Analysevorschrift dar, die hinsichtlich der Chromatextraktion sehr praxisnah ist. Für häufige Routineanalysen des wasserlöslichen Chromats in Zementen und zementhaltigen Zubereitungen ist gerade dieser Extraktionsschritt allerdings auch sehr arbeits- und kostenintensiv. Daher stellt sich für viele Zementhersteller und Hersteller zementhaltiger Zubereitungen die Frage nach einem ökonomischeren alternativen Prüfverfahren für den Routinebetrieb. Alternativen für den Schritt der chemischen Analyse des wasserlöslichen Extrakts eines Zements oder einer zementhaltigen Zubereitung gibt es. So kann statt der spektralphotometrischen auch eine ionenchromatographische oder automatisierte redoxitrimetrische Bestimmung mit gleichem Ergebnis durchgeführt werden. In vielen Fällen ist sogar eine nicht-spezifische Chromanalyse mittels AAS, ICP-OES oder ICP-MS ausreichend. Eine echte Alternative zum aufwendigen Extraktionsschritt nach prEN 196-10 gibt es allerdings nicht, da das Extraktionsverfahren den Erfolg der Chromatreduziererauflösung und damit

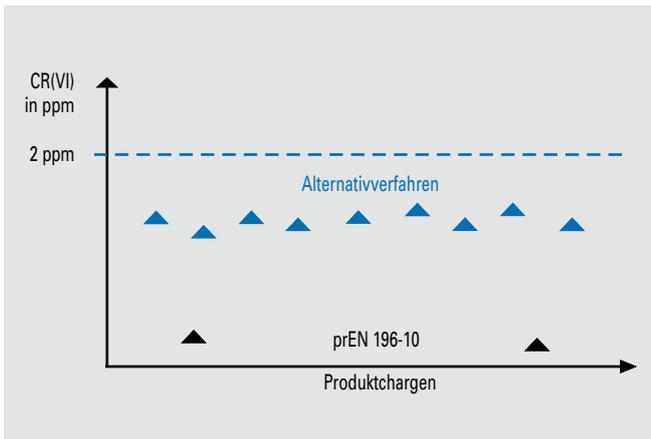


Bild III-34: Vereinfachte Vorgehensweise für die Routineprüfung von wasserlöslichem Chromat im Rahmen der Produktionskontrolle für Zemente und zementhaltige Zubereitungen

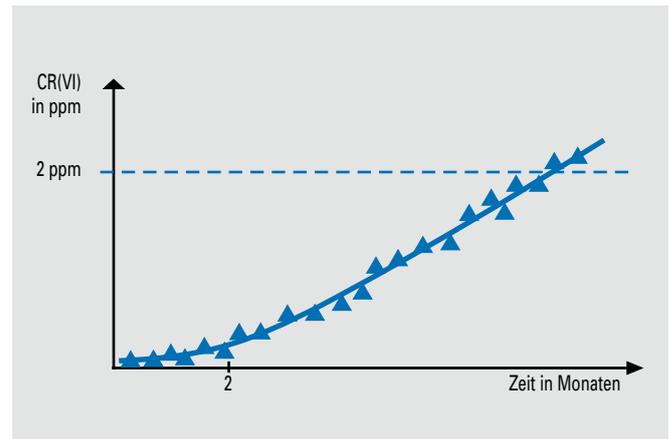


Bild III-35: „Wirksamkeitsabklingkurve“ zum Nachweis des Erfolgs und der Dauerhaftigkeit der Chromatreduktionsmaßnahmen durch den Zementhersteller

auch den Reduktionserfolg bestimmt. Ein anderes Verfahren führt daher nicht zum gleichen Ergebnis wie das Referenzverfahren. Das aber ist die Anforderung an ein Alternativverfahren. Die Extraktion des wasserlöslichen Chromats durch Herstellung eines Normmörtels nach EN 196-1 führt zu praxisnah geringen Ergebnissen. Für die Routineprüfung von wasserlöslichem Chromat zur Produktionskontrolle chromatreduzierter Zemente und zementhaltiger Zubereitungen muss aber nicht immer das Referenzverfahren zur Anwendung kommen. Extraktion und Analyse können beispielsweise auch nach dem im Anhang der TRGS 613 beschriebenen einfacheren Verfahren durchgeführt werden. Die so erhaltenen Analysewerte liegen allerdings nach bisherigen Erfahrungen auf höherem Niveau als die nach dem Referenzverfahren prEN 196-10 erzielten. Wenn allerdings die nach TRGS erzielten Analyseergebnisse unterhalb des Grenzwertes von 2 ppm liegen, dann liegen die nach prEN 196-10 analysierten Chromatgehalte ebenfalls sicher unter 2 ppm (**Bild III-34**). Derart lässt sich die Routineanalyse wasserlöslichen Chromats ökonomischer in die werkseigene Produktionskontrolle einfügen.

Dauerhaftigkeit der Chromatreduktion

Die verschiedenartigen Reduktionsmittel für Chromat in Zement, die derzeit in der Zementindustrie eingesetzt werden, haben unterschiedliche Vorteile. Zur Reduktion der Zementsackware entsprechend der „Branchenregelung“ wurden bislang vor allem Eisen(II)-Sulfatpräparate in Form von Granulaten eingesetzt. Das enthaltene Kristallwasser reagiert mit dem Zement unter Ausbildung einer Hülle aus Zement-

hydratationsprodukten. Diese Hülle reduziert zwar die (passive) Löslichkeit der Präparate, konserviert aber auch den Kern der Eisen(II)-Sulfat-Partikel und schützt ihn vor weiterer Alterung und Inaktivierung. Beim Suspendieren der Zementprobe nach TRGS 613 oder bei der Verarbeitung des Zements werden die umhüllten Partikel dann mechanisch zerkleinert und ihre Auflösung dadurch beschleunigt. Diese Konservierung des Chromatreduzierers erhöht auch die Dauerhaftigkeit der Reduktionswirkung. Liegt der Chromatreduzierer jedoch nicht als Granulat, sondern feinkörnig im Zement vor, so wird zwar auch eine konservierende Hydratschicht um die Chromatreduzierer-Partikel gebildet, aber eine mechanisch unterstützte Auflösung des Reduzierers ist nur noch beschränkt möglich. Eine solche feine Körnung des Reduzierers liegt vor, wenn man den Reduzierer zusammen mit Zement oder mit Zementkomponenten mahlt. Dabei entstehen bei der Zementmahlung auch höhere Temperaturen, die die Freisetzung des Kristallwassers aus dem Chromatreduzierer und damit dessen Passivierung beschleunigen und verstärken. Deshalb wird in der Zementindustrie für diese Art der Dosierung eines Chromatreduzierers verstärkt Zinn(II)-Sulfat verwendet. Dabei handelt es sich um ein kristallwasserfreies Material. Allerdings sind die Kosten für den Einsatz von Zinn(II)-Präparaten deutlich höher als die für Reduzierer auf Eisen(II)-Sulfat-Basis. Im Forschungsinstitut werden deshalb derzeit Versuche mit kristallwasserarmen Eisen(II)-Sulfaten durchgeführt. Die Versuche sollen klären, ob mit Hilfe dieser Präparate ein Kompromiss zwischen technisch einfacher Dosierung durch gemeinsame Vermahlung und ausreichend

dauerhafter Reduktionswirkung erzielt werden kann. Erste Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass die Beurteilung der Reduktionswirkung dieser wasserärmeren Eisen(II)-Sulfate in der Praxis sehr stark vom verwendeten Prüfverfahren, d. h. vor allem vom Suspendierverfahren für die Chromatprüfung abhängt. Die Wirksamkeit dieser Chromatreduzierer ist nach dem neuen praxisnahen europäischen Verfahren in prEN 196-10 gut. Die Prüfergebnisse nach TRGS 613 täuschen dagegen eine geringere Wirksamkeit vor.

Für den Zementhersteller und den Hersteller von zementhaltigen Zubereitungen ist der Nachweis der effektiven Chromatreduzierung an seinem Produkt für die Gewährleistungszeit entscheidend. Hierbei kommt der sachgemäßen Lagerung eine besondere Bedeutung zu. Um die Effizienz und Dauerhaftigkeit der Chromatreduzierung bei sachgerechter Lagerung zu beschreiben, kann die Wirksamkeit in Abhängigkeit von der Lagerzeit ermittelt werden. Wenn die Gleichmäßigkeit von Dosiermenge und Wirksamkeit des Chromatreduzierers gegeben ist, kann einmalig oder besser in regelmäßigen zeitlichen Abständen eine Probe des Produkts zurückgestellt, sachgerecht gelagert und über die Gewährleistungszeit hinaus regelmäßig beprobt und analysiert werden. Die Ergebnisse können in einem Diagramm (Wirksamkeitsabklingkurve) anschaulich dargestellt und mit dem einzuhaltenden Grenzwert von 2 ppm in Beziehung gesetzt werden (**Bild III-35**). Diese Darstellung bietet eine einfache Möglichkeit, die zeitliche Entwicklung der Chromatgehalte ab dem Zeitpunkt der Reduzierung zu demonstrieren.

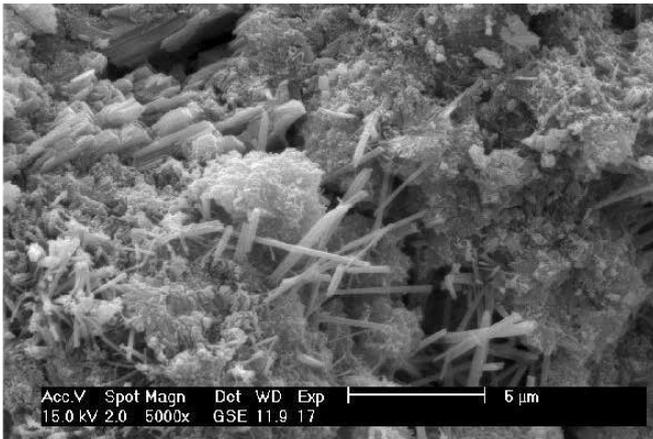


Bild III-36: Sekundärelektronenbild einer Mörtelbruchfläche. Zu sehen sind längliche Ettringitkristalle und dicht verwachsene CSH-Phasen.

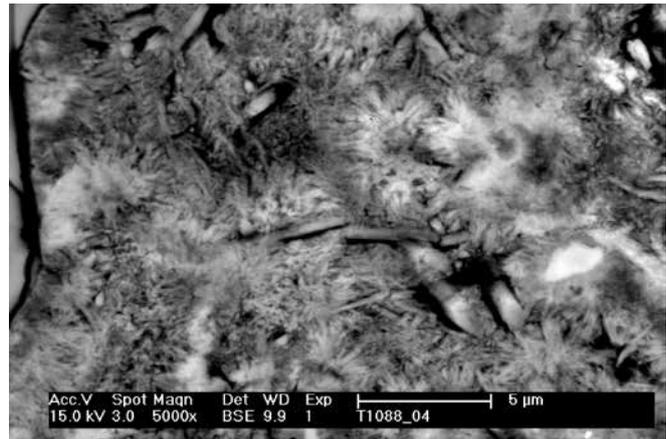


Bild III-37: Rückstreuelektronenbild einer Mörtelanschleifprobe. Es dominieren die faserigen Kristalle der CSH-Phasen. Vereinzelt sind auch Ettringit-Kristallnadeln zu sehen. Die dunklen Bereiche zwischen den Kristallen sind mit Harz gefüllte Kapillar- und Gelporen.

Mess- und Prüfverfahren ■

ESEM

Der Einsatz des Rasterelektronenmikroskops „Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM)“ erfolgt im Wesentlichen in zwei Anwendungsbereichen. Zum einen werden Gefüge bzw. Gefüge bildende Hydratphasen mittels Sekundärelektronen direkt abgebildet. Die Untersuchungen erfolgen an möglichst frischen Probenbruchflächen und dienen dem Verständnis der Abläufe beim Ansteifen, Erstarren und Erhärten von Zementstein, Mörtel und Beton. Im Vordergrund steht die topologische und morphologische Gefügebeurteilung der kristallinen Bestandteile. **Bild III-36** bietet hierfür ein Beispiel. Dabei ist zu beachten, dass die Bruchfläche innerhalb des Gefüges bevorzugt durch Schwächungszonen verlaufen kann, z. B. Bereiche erhöhter Porosität.

Zum anderen werden Fragestellungen rund um die Beurteilung von Zementklinkern bearbeitet. Dazu werden, wie bei lichtmikroskopischen Untersuchungen, Klinkeranschliffe benötigt. Die Oberflächen werden jedoch nicht angeätzt, sondern direkt mikroskopiert. Mit dem Rückstreuelektronendetektor werden von der polierten Probenoberfläche Aufnahmen gemacht, die dann gemeinsam mit zugehörigen mikroanalytischen Untersuchungen (Punktanalysen, Elementprofile oder Elementverteilungsbilder mittels energiedispersivem Röntgendetektor) ausgewertet werden (siehe Tätigkeitsbericht 2001-2003).

In letzter Zeit nimmt die Bedeutung von Untersuchungen an Zementsteinen, Mörteln und Betonen mittels Anschleifproben

zu. Man möchte nicht nur qualitative, sondern auch quantitative Aussagen zum vorhandenen Phasenbestand und dessen Verteilung haben. Hierzu sind aber Bruchflächen nicht gut geeignet. Aufgrund der nicht definierten Oberflächenbeschaffenheit sind quantitative Elementanalysen nur sehr ungenau. Daher kommen für derartige Anforderungen nur plane Schleifproben in Betracht. Speziell bei nur kurz hydratisierten Proben – im Alter von wenigen Stunden oder Tagen – ist die Präparation der Anschliffe jedoch nicht unproblematisch. Die Hydratphasen sind noch weich und die Festigkeitsunterschiede zu den unreaktierten Bestandteilen sehr groß. Erst vor kurzem wurden Präparationsverfahren für derartige Proben optimiert. Um eine hohe Qualität der Probenoberfläche mit möglichst wenig Relief zu bekommen, ist eine sehr zeitaufwendige Bearbeitung erforderlich. Zuerst muss das hydratisierte Gefüge durch Trocknung entwässert und dann mit einem sehr dünnflüssigen Epoxidharz getränkt werden. Dieses muss in der Lage sein, auch in Kapillar- und Gelporenbereiche einzudringen, ohne die Hydratphasen zu beeinflussen. In mehreren Polierschritten, die bis zu mehrere Stunden dauern können, wird die Oberfläche eingeebnet. Zuletzt wird mit einer Diamantkörnung von $\frac{1}{4} \mu\text{m}$ gearbeitet. Als Resultat erhält man eine Probenoberfläche, die keine unerwünschten Topografiekontraste liefert und nur einer sehr dünnen Kohlenstoff- oder Metallbeschichtung bedarf, um aufladungsfrei im Rasterelektronenmikroskop untersucht werden zu können. **Bild III-37** verdeutlicht die Leistungsfähigkeit des Verfahrens. So sind im Rückstreuelektronenbild bei 5000facher Vergrößerung neben den größeren Ettringit-Kristallnadeln auch die

feinen Strukturen der faserigen CSH-Kristalle zu erkennen.

Hydratationswärme

Zur Bestimmung der Hydratationswärme eines Zements stehen im europäisch harmonisierten Normenwerk seit Januar 2004 zwei Referenzverfahren zur Verfügung: zum einen das Lösungsverfahren nach EN 196-8 und zum anderen das teiladiabatische Verfahren – auch Langavant-Verfahren genannt – nach EN 196-9. Die DIN EN 196-8 ersetzt die hierzulande zuvor gültige Norm DIN 1164-8 (11/1978).

Zwar sind Lösungsverfahren und teiladiabatisches Verfahren nun beide Referenzverfahren, jedoch wird in Deutschland traditionell zur Bestimmung der Hydratationswärme praktisch nur das Lösungsverfahren genutzt. Das teiladiabatische Verfahren hat, anders als beispielsweise in Frankreich, hierzulande kaum Bedeutung.

Die Unterschiede zwischen der DIN EN 196-8 und der DIN 1164-8 sind gering und betreffen nur Teilschritte des Arbeitsablaufs. Das Messprinzip ist unverändert. Danach sind die Lösungswärmen von nicht hydratisiertem Zement und Zement, der unter genormten Bedingungen 7 Tage lang hydratisiert wurde, in einer Säuremischung zu bestimmen. Aus der Differenz der Lösungswärmen errechnet sich die Hydratationswärme. Die Methode ist seit Jahrzehnten bewährt. Dennoch wird nach einem Alternativverfahren gesucht, da das Referenzverfahren einerseits sehr arbeitsintensiv ist und andererseits aus Sicht des Arbeitsschutzes als nicht unkritisch gilt. Das Auflösen der Proben erfolgt nämlich

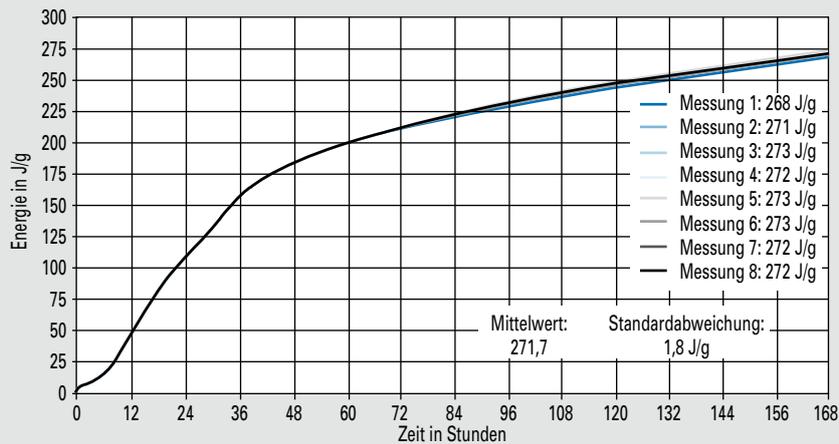


Bild III-38: Hydratationswärmebestimmung eines CEM III/A 32,5 N-NW/NA mittels Wärmeflusskalorimeter (TAM Air). Die Standardabweichung von 8 Messungen beträgt 1,8 J/g und entspricht relativ betrachtet 0,7 % des Messergebnisses.

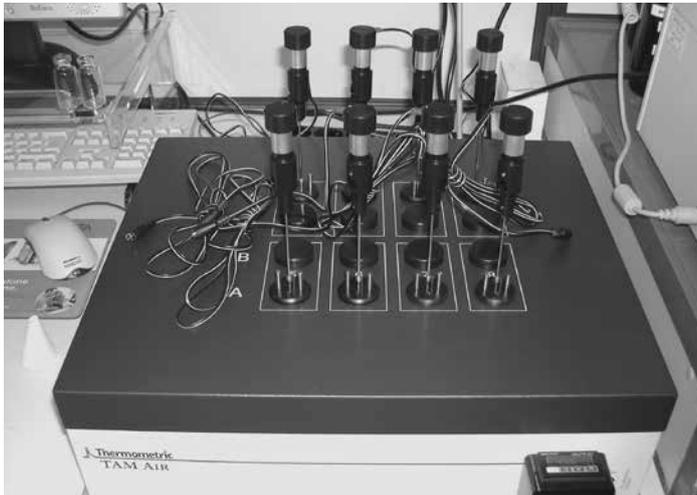


Bild III-39: Wärmeflusskalorimeter TAM Air mit 8 unabhängigen Messplätzen, die mit Admix-Titrationszellen belegt sind

in einem Gemisch aus Flusssäure und Salpetersäure. Da Flusssäure zu den besonders gefährlichen Stoffen gehört, verzichten immer mehr Betriebslabore bei ihrer Eigenüberwachung auf die Durchführung des Lösungsverfahrens. Die Hydratationswärme wird dann alternativ, zumeist mit dem Verfahren der isothermen Wärmeflusskalorimetrie, bestimmt.

Seit Mitte 2003 verfügt das Forschungsinstitut über ein isothermes Wärmeflusskalorimeter (Typ TAM Air). Zunächst wurden in ausgiebigen Vergleichsversuchen die Ergebnisse der Lösungskalorimetrie mit denen der Wärmeflusskalorimetrie verglichen. Aufbauend auf diesen Ergebnissen gilt es zu prüfen, ob die Wärmeflusskalorimetrie als Alternativverfahren zur Bestimmung der Hydratationswärme eingeführt werden und damit das Referenzverfahren im Analysealltag ersetzen kann. Darüber

hinaus kommt die Wärmeflusskalorimetrie auch deshalb zum Einsatz, weil sie nicht nur den Wert der insgesamt freigesetzten Wärmemenge liefert. Vielmehr ergibt sich zusätzlich der Verlauf der Wärmefreisetzung, aus dem sich spezifische Informationen zum Hydratationsverhalten des Zements erzielen lassen.

Das Wärmeflusskalorimeter des Forschungsinstituts ist mit 8 unabhängigen Kalorimetermessplätzen ausgestattet und kann im Temperaturbereich zwischen 5 und 60 °C mit einer Genauigkeit von $\pm 0,02$ K betrieben werden. Anhand der bisherigen Erfahrungen zeigt das Gerät Messergebnisse mit sehr guter Reproduzierbarkeit. Bei einem Normalzement mit einer typischen Hydratationswärmefreisetzung von 200 bis 300 J/g nach 7-tägiger Hydratation beträgt die Standardabweichung der Messergebnisse etwa 2 J/g (Bild III-38). Alle acht

Kalorimetermessplätze sind mit so genannten Admix-Zellen ausgestattet. Dies sind Mischzellen, die über einen Rührer sowie Titrationspipetten verfügen (Bild III-39). Der Zement wird in der Mischzelle vorgelegt. Wasser und andere Flüssigkeiten werden über die Pipetten nach Bedarf zugegeben, sobald alle Komponenten im Kalorimeter temperiert sind. Dadurch lässt sich ein Nachteil vermeiden, den Kalorimeter aufweisen, die eine Mischung von Zement und Wasser im Gerät nicht vorsehen. Bei der Mischung außerhalb des Kalorimeters wird die anfängliche Wärmefreisetzung nicht vom Gerät erfasst und fehlt somit in der Gesamtbilanz. Darüber hinaus besteht mit dem Wärmeflusskalorimeter und der Verwendung der Admix-Zellen die Möglichkeit, den Einfluss von Zusatzmitteln und deren Zugabezeitpunkt auf den Hydratationsverlauf zu untersuchen. Bild III-40 zeigt die Wirkung verschiedener verzögernder Zusatzmittel auf die Wärmefreisetzung eines Portlandzements.

Um zu prüfen, ob die Wärmeflusskalorimetrie als Alternativverfahren geeignet ist, wurden im Forschungsinstitut verschiedene Untersuchungen durchgeführt. So wurden über einen begrenzten Zeitraum alle zur NW-Prüfung anstehenden Zemente sowohl mit dem Lösungs- als auch der Wärmeflusskalorimetrie untersucht. In Bild III-41 sind die Messergebnisse nebeneinander aufgetragen. Es fällt auf, dass bei den hüttensandhaltigen Hochofenzementen die Messwerte der Wärmeflusskalorimetrie über denen der Lösungskalorimetrie liegen, im Mittel um etwa 12 %. Für Portlandzemente besteht hingegen eine gute Übereinstimmung. Daher wird vermutet, dass die Hüttensande für diese Abweichungen verantwortlich sind. Die genaue Ursache soll mit weiteren, noch laufenden Untersuchungen geklärt werden.

Auch ein 2003 von der Universität Lund initiiertes internationales Ringversuch zur Zementkalorimetrie sollte dazu genutzt werden zu prüfen, ob die Wärmeflusskalorimetrie als Alternativverfahren in Betracht kommt. Mit 18 anderen Instituten hat sich das Forschungsinstitut mittels isothermer Wärmeflusskalorimetrie und gemeinsam mit 2 weiteren Instituten mittels Lösungskalorimetrie am Ringversuch beteiligt. Die Untersuchungen wurden an einem Portland- und einem Hochofenzement durchgeführt. Die Ergebnisse der Wärmeflusskalorimetrie ergaben sowohl eine gute Reproduzierbarkeit als auch eine gute Vergleichbarkeit. Im Vergleich der Methoden konnten gut übereinstimmende Messergebnisse für den Portlandzement, nicht

jedoch für den Hochofenzement erzielt werden. Da allerdings nur 3 Laboratorien Lösungskalorimetrie durchführten, ist die statistische Aussagekraft der Ergebnisse im Vergleich zu denen der Wärmeflusskalorimetrie gering. Aus diesem Grunde hat das Forschungsinstitut Ende 2004 einen nationalen Vergleichsversuch gestartet. Hieran nehmen 18 Laboratorien mit dem Verfahren der Wärmeflusskalorimetrie und 10 Laboratorien mit dem der Lösungskalorimetrie teil. Zudem befinden sich 6 verschiedene Zemente in der Prüfung. Die Ergebnisse sollen im Frühjahr 2005 vorliegen und als Basis für die angestrebte Validierung der isothermen Wärmeflusskalorimetrie als Alternativverfahren dienen.

Röntgenfluoreszenzanalyse

Zur Bestimmung der chemischen Haupt- und Nebenbestandteile von Zement ist die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) als spektrometrisches Verfahren eine seit langem etablierte Untersuchungsmethode. Sie hat sich zur Prozesskontrolle bei der Zementherstellung und bei der Qualitätssicherung im Rahmen der Eigen- und Fremdüberwachung gleichermaßen bewährt. Im Unterschied zur nasschemischen Analyse bietet die Röntgenfluoreszenz die Möglichkeit, mehrere chemische Elemente in einem Analysengang an demselben Präparat zu bestimmen.

Im Forschungsinstitut der Zementindustrie kann die Röntgenfluoreszenzanalyse an Pulverpresslingen oder auch an geschmolzenen Tabletten vollzogen werden. Dabei hängt die Wahl der Präparationsmethode von der Probenbeschaffenheit und auch von den zu bestimmenden Elementen ab. Flüchtige oder oxidierbare Komponenten können nur an thermisch unbehandelten Proben, also an Presstabletten, vollständig bestimmt werden. Bei nicht flüchtigen Bestandteilen lässt sich die Messgenauigkeit erhöhen, indem auf die Schmelztablettenpräparation zurückgegriffen wird. Dabei wird die Probe mit einem Flussmittel in einem geeigneten Mengenverhältnis, beispielsweise 1:10, vermischt und bei 950 °C aufgeschmolzen. Im Anschluss führt eine hinreichend schnelle Kühlung zu glasigem Erstarren der homogenen Schmelze. Matrixeffekte, die durch die Korngrenzen der Partikel in einer Presstablette hervorgerufen werden, werden auf diese Weise eliminiert. Zudem wird die gegenseitige Beeinflussung der Fluoreszenzintensität unterschiedlicher Elemente durch die Verdünnung in der Schmelze minimiert. Damit kann eine Vielzahl unterschiedlich zusammengesetzter Stoffe mit derselben Kalibrierung analysiert werden.

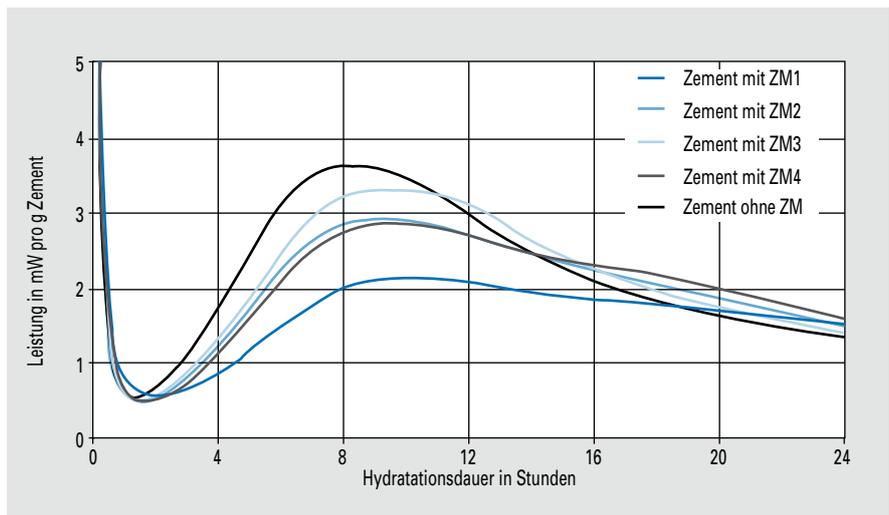


Bild III-40: Einfluss von 0,5 M.-% Zusatzmittel (ZM1 bis ZM4) auf das Hydratationsverhalten eines Portlandzements während der ersten 24 Stunden

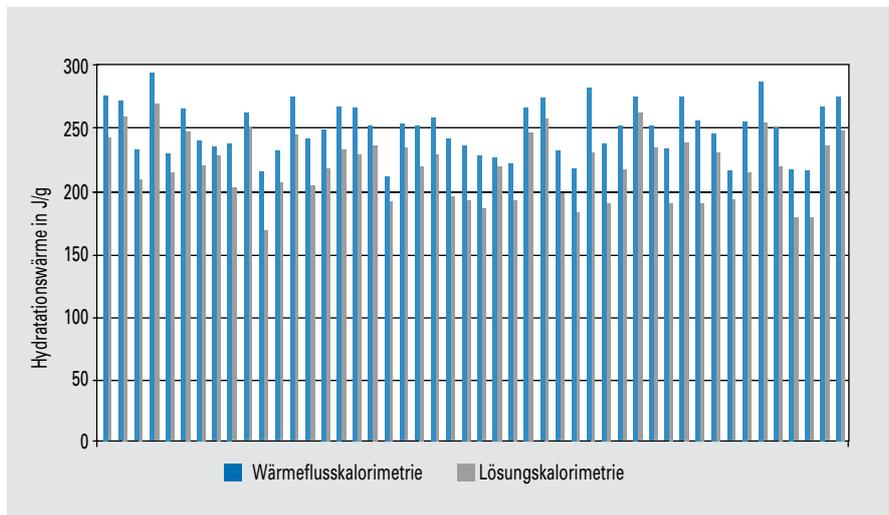


Bild III-41: Vergleich der Hydratationswärmebestimmung mittels Lösungsverfahren und isothermer Wärmeflusskalorimetrie (TAM Air) auf der Basis von 48 Zementproben

Eine Arbeitsgruppe des CEN befasst sich mit der Einbindung der Röntgenfluoreszenzanalyse in die Reihe der Zementprüfnormen. Die Fertigstellung der RFA-Norm ist für das Jahr 2005 vorgesehen. Neben der Verfahrensbeschreibung an sich ist ein wesentlicher Bestandteil der Norm die Einordnung der Röntgenfluoreszenz in Bezug auf die bislang genormten chemischen Referenzverfahren. Das Forschungsinstitut strebt an, die RFA nicht als neues Referenzverfahren, sondern als Alternativverfahren neben den bestehenden Methoden zu normen. Im Schiedsfall sind aus analytischer Sicht gravimetrisch oder volumetrisch bestimmbare Grundgrößen, auf denen die meisten nasschemischen Verfahren beruhen, gegenüber indirekten Größen, zu denen spektrometrische Messdaten zählen, zu bevorzugen.

Röntgendiffraktometrie

Mit Hilfe der Röntgendiffraktometrie können kristalline Bestandteile unmittelbar bestimmt werden. Im Forschungsinstitut wird die Röntgendiffraktometrie zur Charakterisierung von Stoffen eingesetzt, die in unterschiedlicher Weise im Zusammenhang mit der Herstellung und Anwendung von Zement stehen. Das Spektrum reicht von qualitativen und quantitativen Klinkeruntersuchungen über die Bestimmung von Hydratationsprodukten bis zur Prüfung von Pigmenten nach DIN EN 12878.

Die Rietveld-Verfeinerung hat sich zu einer leistungsfähigen Methode bei der quantitativen Beurteilung von Röntgenpulverdiffraktogrammen entwickelt. Die aus der Rietveld-Verfeinerung berechneten Phasengehalte für Klinker und Portlandzemente sind in der Regel zuverlässiger als die anhand der chemischen Zusammensetzung errechneten Bogue-Werte.

Durch den zunehmenden Einsatz der Rietveld-Methode sowohl in Zementwerken als auch in Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen ist der Bedarf entstanden, das zugrunde liegende Messverfahren der Röntgenbeugung und auch die Rietveld-Verfeinerung selbst als Analyseverfahren zu validieren. Daher wurde ein Ringversuch initiiert, der zum Ziel hat, den Status Quo der Umsetzung der Rietveld-Methode innerhalb der Zementindustrie abzubilden und Wege zur Lösung allgemein auftretender Probleme aufzuzeigen. Nach Abschluss des ersten Teils, bei dem ein Klinker und ein Portlandzement analysiert werden, ist eine Erweiterung des Ringversuchs vorgesehen, in der u. a. die Quantifizierung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen erprobt werden soll. In diesem Zusammenhang werden im Forschungsinstitut Methoden auf der Basis der Rietveld-Verfeinerung entwickelt, die auch die Quantifizierung glasiger Bestandteile wie z. B. Hüttensand ermöglichen.

Grundlegende Voraussetzung für eine erfolgreiche Rietveld-Quantifizierung ist die Kenntnis aller in der untersuchten Probe vorliegenden Phasen und ihrer Kristallstrukturen. Bei der Bestimmung von Klinker und Portlandzement hat es sich bewährt, eine Teilprobe der untersuchten Substanz mit Methanol und Salicylsäure zu behandeln, um die Calciumsilicate herauszulösen. Durch die zusätzliche Messung des Rückstands können die verbliebenen weiteren Klinkerphasen mit hinreichender Sicherheit identifiziert und anschließend quantifiziert werden.

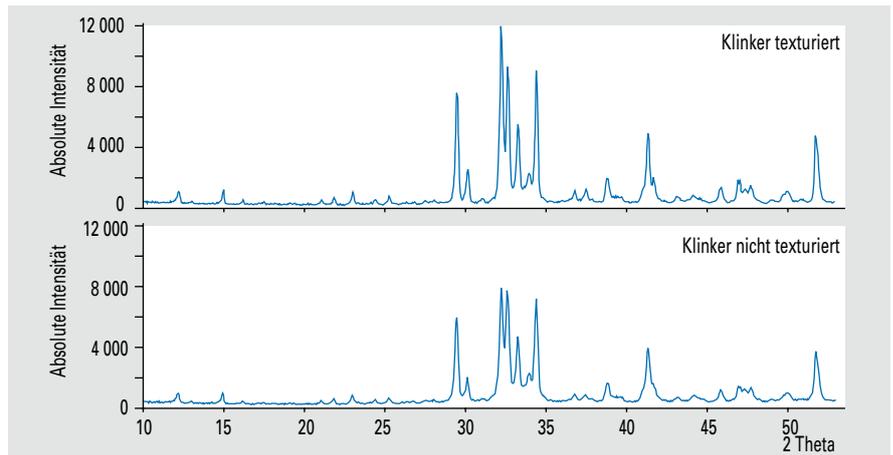


Bild III-42: Röntgenpulverdiffraktogramme eines Zementklinkers mit und ohne Alit-Vorzugsorientierung

Weiterhin ist die Berücksichtigung präparationsbedingter Textureffekte maßgebend für die Richtigkeit der Rietveld-Verfeinerung. Unzureichend berücksichtigte Vorzugsorientierungen der Kristallindividuen im Präparat können zu Abweichungen von mehreren M.-% in Bezug auf die Phasengehalte führen. Prinzipiell können Textureffekte im Rahmen der Rietveld-Verfeinerung durch geeignete mathematische Modelle nachvollzogen werden. Eine weitere Möglichkeit, diese Fehlerquelle zu eliminieren, besteht in der geeigneten Wahl der Messanordnung. Bei Transmissionspräparaten (Kapillare oder Flachpräparat) ist die gerichtete Einregelung anisotroper Partikel weit weniger ausgeprägt als bei gepressten Präparaten.

Umgekehrt ermöglicht die Beobachtung von Textureffekten bei der üblichen Messanordnung nach Bragg-Brentano eine grobe Einschätzung der Kristallitgrößen. **Bild III-42** zeigt am Beispiel eines Klinkers den Einfluss der Vorzugsorientierung von Alit. Insbesondere der Reflex bei $32,3^\circ$ (2θ) zeigt im texturierten Präparat eine deutlich höhere Intensität als im texturfreien Präparat. Die zugrunde liegende Vorzugsorientierung wurde durch eine Vergrößerung der Alite infolge einer verlängerten Sinterzone im Drehofen hervorgerufen. Die in anderen Fällen herangezogene Reflexbreite als Maß für die Kristallitgröße wird im vorliegenden Fall von weiteren Einflussgrößen überlagert. Hierzu zählen geometrische Effekte und der Einbau von Fremdionen.

Zulassungen

Weichen Bauprodukte von Normen und weiteren technischen Regeln ab, so ist für ihre Verwendung im bauaufsichtlich relevanten Bereich eine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) notwendig. Im Einzelfall kann auch eine Zustimmung der zuständigen Bauaufsichtsbehörde erteilt werden. Die für eine Zulassung erforderlichen Untersuchungen für hydraulische Bindemittel und für Betone werden auch vom FIZ durchgeführt.

Ein Beispiel für bauaufsichtlich zugelassene Zemente sind CEM II/B-S-NA, deren Alkaligehalt oberhalb von 0,70 M.-% (Na_2O -Äquivalent) liegt. Den Zulassungen liegen die Untersuchungen des Forschungsinstituts zugrunde.

Nicht alle Zemente, die den Normenreihen DIN EN 197 bzw. DIN 1164 entsprechen, können uneingeschränkt für Beton nach DIN 1045-2 eingesetzt werden, da für sie zum Teil bisher keine baupraktischen Erfahrungen und keine wissenschaftlichen Untersuchungen vorliegen. So dürfen zum Beispiel Portlandkompositzemente CEM II/B-M (S-LL) nach DIN 1045-2 nur für Beton ohne Korrosions- oder Angriffsrisiko (Expositionsklasse X0) sowie Gründungs- und Innenbauteile (XC1, XC2) eingesetzt werden. Soll der Anwendungsbereich auf weitere Expositionsklassen erweitert werden, muss eine Anwendungszulassung des DIBt vorliegen. Auch die Untersuchungen für solche Zulassungen werden vom Institut nach eingehender Beratung der Antragsteller durchgeführt. Einige deutsche Zementhersteller haben im Berichtszeitraum neue CEM II-M-Zemente entwickelt. Erste bauaufsichtliche Zulassungen wurden erteilt.

IV

Güteüberwachung und Qualitätssicherung von Zement

Nach wie vor bilden die Güteüberwachung und die Qualitätssicherung von Zement und zementartigen Bindemitteln eine Kernkompetenz des VDZ. Allerdings hat sich das Erscheinungsbild der Überwachungsgemeinschaft des VDZ in den letzten 10 Jahren nachhaltig verändert. Die meisten Bindemittel werden inzwischen nach europäisch harmonisierten Normen überwacht. Sowohl bei den Regelwerken als auch den Randbedingungen für die Überwachung wurde der Wechsel von einer eher national geprägten Güteüberwachung hin zu einer europäisch ausgerichteten Qualitätssicherung vollzogen. Dementsprechend waren in den vergangenen Jahren die internen Strukturen der Überwachungsgemeinschaft des VDZ konsequent angepasst und nach internationalen Gesichtspunkten ausgerichtet worden. Dieser Prozess wurde im Berichtszeitraum fortgeführt. Im Vordergrund standen dabei die weitere Professionalisierung der Zertifizierungsdienstleistungen und die Variabilisierung der Leistungsverrechnung.

Die Anzahl der zertifizierten und überwachten Bindemittel hat sich im Berichtszeitraum kaum verändert. Rund 540 Bindemittel aus 64 Werken wurden nach gesetzlichen Regelwerken überwacht. Die Anzahl der Bindemittel, die aufgrund von bestehenden Vereinbarungen mit ausländischen Stellen zusätzlich nach privatrechtlichen Regelwerken überwacht werden, hat geringfügig zugenommen. Im Berichtszeitraum wurden die Anerkennungsbereiche nochmals geringfügig erweitert. Die Durchführung der Überwachung nach der europäischen Überwachungsnorm für Zement EN 197-2 und den zugehörigen Durchführungsbestimmungen hat sich zweifellos bewährt. Die EN 197-2 bildet inzwischen auch die Vorlage für entsprechende Überwachungsregeln für Zusatzstoffe. Im Berichtszeitraum wurden in Umsetzung der europäischen Chromatrichtlinie erstmals Festlegungen für die Überwachung des wasserlöslichen Chromatgehalts erstellt.

Die 1998 eingerichtete Zertifizierungsstelle für Managementsysteme FIZ-Zert wurde im Berichtszeitraum re-akkreditiert. Während in der Vergangenheit ausschließlich QM-Systeme zertifiziert wurden, wurden im Berichtszeitraum erstmals auch UM-Systeme zertifiziert und CO₂-Emissionen verifiziert.

Im Bereich der Zementnormung sind die wesentlichen Produkt- und Prüfnormen inzwischen fertig gestellt. Die Aktivitäten konzentrieren sich daher auf die Vervollständigung der vorhandenen Normen. Im Berichtszeitraum wurden allein 4 europäisch harmonisierte Zement- und Bindemittelnormen und 6 Prüfnormen als Neu- oder als überarbeitete Fassung fertig gestellt. Erstmals existieren jetzt europäisch einheitliche Festlegungen für Zemente mit niedriger Hydratationswärme. Auch wurden die wesentlichen Prüfnormen für Zement 15 Jahre nach ihrer Erstveröffentlichung überarbeitet. Um den weltweiten Entwicklungen Rechnung zu tragen, werden zukünftig die Normungsaktivitäten zwischen dem europäischen Gremium CEN/TC 51 und dem ISO-Gremium TC 74 enger koordiniert.



Überwachungsgemeinschaft des VDZ

Der VDZ wurde vor mehr als 125 Jahren gegründet, um die Prüfung und Beurteilung der Qualitätsmerkmale der Zemente zu vereinheitlichen. Demgemäß gehört die Prüfung, Überwachung und Zertifizierung von Zement und zementartigen Bindemitteln zur Erfüllung der Schutzziele der Landesbauordnungen bzw. im Sinne des Bauproduktengesetzes zu den satzungsgemäßen Aufgaben des VDZ. Zu diesem Zweck unterhält der Verein die Überwachungsgemeinschaft als Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle (PÜZ-Stelle).

Insbesondere in den letzten 10 Jahren hat sich das Erscheinungsbild der Überwachungsgemeinschaft erheblich gewandelt. Bedingt durch Umstellungen in den europäischen Regelwerken und notwendige Anpassungen der internen Strukturen wurde in dieser Zeit der Wandel von einer eher national ausgerichteten „Güteüberwachung“ hin zu einer modernen, stärker europäisch ausgerichteten Produktzertifizierung vollzogen. Die Neuausrichtung des Forschungsinstituts hat in den vergangenen Jahren zu einer deutlich veränderten Einnahmenstruktur geführt. So stützt sich die Gemeinschaftsarbeit zunehmend auf externe Forschungsmittel und auf Einnahmen, die der VDZ aus Dienstleistungen für die Mitglieder erzielt. Im Berichtszeitraum stand daher die konsequente Professionalisierung auch der Zertifizierungsdienstleistungen im Vordergrund. Durch Umstellung des Abrechnungssystems wurden eine stärker verursachergerechte Kostenzuordnung und eine stärkere Variabilisierung der Leistungsverrechnung möglich. Im Forschungsinstitut wurden in den vergangenen Jahren die Voraussetzungen dafür geschaffen, dass die Leistungserbringung bei insgesamt steigenden Anforderungen effizient und zuverlässig erfolgt.

Unabhängig von diesen Veränderungen bleibt die Überwachungsgemeinschaft auch weiterhin eine Kernkompetenz des VDZ und stellt eine wesentliche Klammer der Gemeinschaftsforschung dar. Die umfangreiche und langjährige Datengrundlage, die hierzu im Forschungsinstitut entstanden ist, ist Voraussetzung einer erfolgreichen Vereinstätigkeit. Viele baupraktische Fragen, aber auch Fragen der Zementnormung, konnten vom VDZ nur deshalb kompetent beantwortet werden, weil die entsprechenden Zementdaten nahezu aller deutschen Zemente im Forschungsinstitut vorlagen. Diese Daten

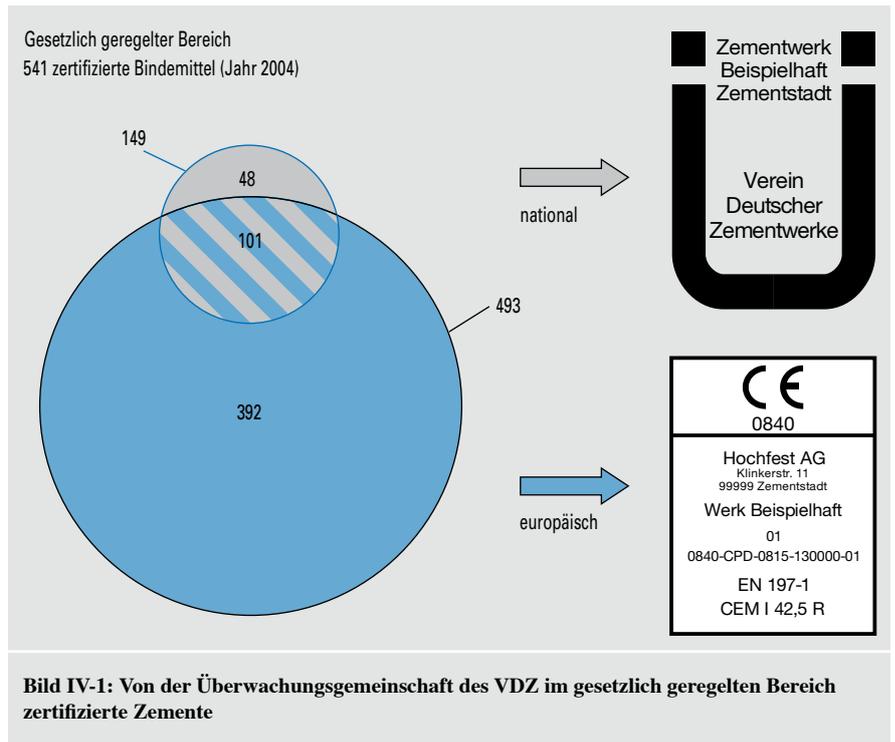


Bild IV-1: Von der Überwachungsgemeinschaft des VDZ im gesetzlich geregelten Bereich zertifizierte Zemente

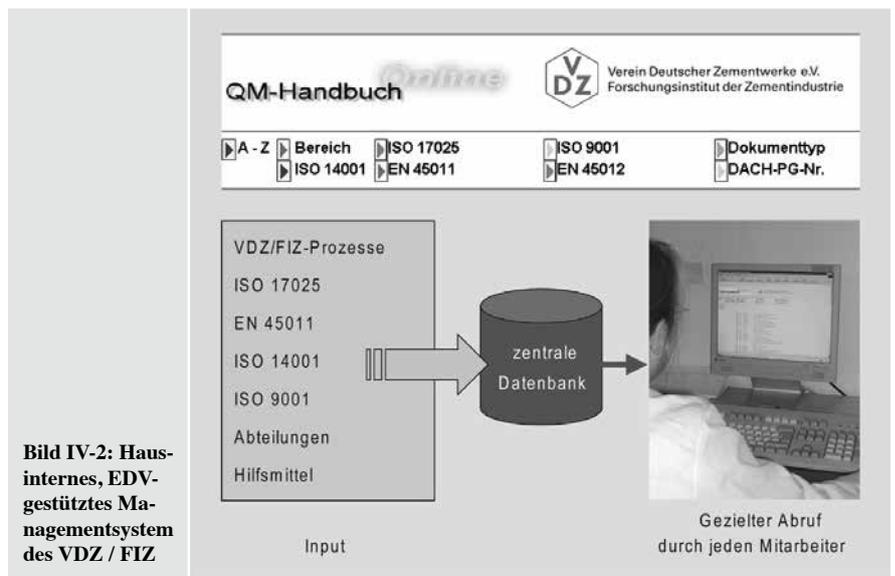


Bild IV-2: Hausinternes, EDV-gestütztes Managementsystem des VDZ / FIZ

können in anonymisierter Form aufbereitet und für wissenschaftliche Auswertungen genutzt werden.

Anerkennung und Akkreditierung

Die Überwachungsgemeinschaft des VDZ ist als Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle im gesetzlich geregelten Bereich tätig. Die Anerkennung erstreckt sich einerseits auf die auf nationaler Ebene gültigen Landesbauordnungen (LBO). Die Übereinstimmung von Bauprodukten mit den Landesbauordnungen wird durch Anbringen des nationalen Übereinstimmungszeichens (Ü-Zeichen) kenntlich gemacht. Weiterhin ist die Überwachungsgemeinschaft des VDZ nach dem deutschen Bauproduktengesetz (BauPG), das die

EU-Bauproduktenrichtlinie umsetzt, notifiziert und in Brüssel als Stelle Nr. 0840 geführt. Die Konformität mit europäischen harmonisierten Normen und Regelwerken wird durch Anbringen der CE-Kennzeichnung kenntlich gemacht. Seit Einführung der ersten harmonisierten Zementnorm EN 197-1 im Jahr 2001 hat sich eine starke Verschiebung in den Tätigkeitsschwerpunkten der Überwachungsgemeinschaft des VDZ ergeben. Wie Bild IV-1 zeigt, sind im gesetzlich geregelten Bereich inzwischen knapp 85 % der Bindemittel nach europäischen Regelwerken zertifiziert. Ein Überlappungsbereich ergibt sich für Zemente mit besonderen Eigenschaften, die nach der nationalen Restnorm DIN 1164-10 zertifiziert werden, die aber gleichzeitig

die Anforderungen der europäischen Norm EN 197-1 erfüllen.

Obwohl dies gesetzlich nicht gefordert ist, hat sich die Überwachungsgemeinschaft des VDZ im Jahr 2002 darüber hinaus privatrechtlich als Produktzertifizierer nach EN 45011 akkreditieren lassen. Zusätzlich wurden alle relevanten Laborprüfungen nach ISO 17025 akkreditiert. Hierfür wurde hausintern ein schlankes, EDV-gestütztes Managementsystem eingerichtet, das die Anforderungen 4 verschiedener Nachweisnormen erfüllt (Bild IV-2). Dies geschah mit der Absicht, die Überwachungsgemeinschaft einer regelmäßigen, unabhängigen externen Begutachtung und damit vergleichbaren Bewertungskriterien zu unterwerfen, wie sie für andere Zertifizierungsstellen in Europa gelten.

Die Anerkennung durch die zuständigen Bauaufsichtsbehörden erstreckt sich auf zementartige Bindemittel, Betonzusatzstoffe, -mittel und zementhaltige Zubereitungen sowohl im Geltungsbereich von Normen als auch von bauaufsichtlichen Zulassungen (Tafel IV-1). Die Überwachungsgemeinschaft des VDZ zertifiziert vorwiegend Zemente und zementartige Bindemittel. Um das Dienstleistungsangebot jedoch möglichst attraktiv für Kunden zu gestalten, wurden die Tätigkeits- und Anerkennungsbereiche mit der Zeit erweitert und um weitere Bauprodukte ergänzt. Auch im Berichtszeitraum wurde ein Antrag auf Ergänzung bzw. Erweiterung der Anerkennung um weitere Bauprodukte gestellt.

Fremdüberwachung von Zement nach gesetzlichen Regelwerken

Tafel IV-2 enthält eine Übersicht über die von der Überwachungsgemeinschaft des VDZ im Jahr 2004 zertifizierten bzw. überwachten Zemente und hydraulischen Bindemittel. 541 Bindemittel, davon 505 (93%) Zemente, wurden nach gesetzlichen Regelwerken überwacht (Bild IV-3). In den Zahlen sind 13 Zemente aus 8 ausländischen Werken enthalten. Darüber hinaus wurden aufgrund einer Fremdüberwachung durch eine ausländische Stelle für 2 Zemente durch die Überwachungsgemeinschaft des VDZ Übereinstimmungszertifikate nach DIN 1164 erteilt. Insgesamt hat seit 2002 die Anzahl der fremdüberwachten Bindemittel um 9 zugenommen. Bedingt durch Werkstilllegungen ist die Anzahl der überwachten Werke mit 64 im Vergleich zu 68 (2002) zurückgegangen. Je Werk wurden im Mittel 8,4 Bindemittel fremdüberwacht (Bild IV-4).

Tafel IV-1: Anerkennungsbereiche der Überwachungsgemeinschaft des VDZ als Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle für Bauprodukte

Bauprodukte	Technische Regel(n)	Konformitäts-Nachweisstufe	
		BPG	LBO
Bindemittel			
Normalzement	DIN EN 197-1	1 +	
Zement mit besonderen Eigenschaften	EN 197-4	1 +	
	EN 14216	1 +	
	DIN 1164-10, -11		ÜZ
Tonerdezement	EN 14647	1 + ²⁾	
Putz- und Mauerbinder	EN 413-1	1 +	
Hydraulischer Tragschichtbinder	DIN 18506		(ÜZ) ¹⁾
Baukalk	EN 459-1	2	
Sonstige zementartige Bindemittel (inkl. Spritzbetonzemente)	Zulassung ⁴⁾		ÜZ
Betonzusatzstoffe			
Typ I-Zusatzstoffe (z. B. Pigmente)	EN 12878	2 + ²⁾	
Typ II-Zusatzstoffe (Flugasche, Silicastaub)	EN 450-1	1 +	
	EN 13263-1	1 + ²⁾	
Trass	DIN 51043		ÜZ
Einzelpigmente	DIN EN 12878		ÜZ
Pigmente in Lieferform	DIN EN 12878		ÜHP
Steinkohlenflugasche	DIN EN 450		ÜZ ⁵⁾
Sonstige Betonzusatzstoffe	Zulassung ⁴⁾		ÜZ
Betonzusatzmittel			
	EN 934-2, -3, -4	2 +	
	DIN V 18998		ÜHP
	Zulassung ⁴⁾		ÜZ
Gesteinskörnungen			
	EN 12620	2 +	
	EN 13055-1	2 +	
	EN 13139	2 +	
Mauermörtel			
	EN 998-2	2 +	
Zementhaltige Zubereitungen⁶⁾			
Einpressmörtel	DIN EN 447		ÜZ

BPG: Bauproduktengesetz LBO: Landesbauordnungen

- ¹⁾ bauaufsichtlich nicht relevant, Nachweisstufe entspricht ÜZ
- ²⁾ europäisch harmonisierte Normen liegen noch nicht vor
- ³⁾ beantragt
- ⁴⁾ bei wesentlichen Abweichungen hinsichtlich Herstellverfahren, Zusammensetzung und Eigenschaften von Norm
- ⁵⁾ bis zum Gültigwerden der europäisch harmonisierten Norm
- ⁶⁾ weitere Anwendungen beantragt

Für die von der Überwachungsgemeinschaft des VDZ fremdüberwachten inländischen Zemente sind in Tafel IV-3 die Anzahl und die zugehörigen inländischen Versandmengen des Jahres 2004 im Vergleich zu 2002 (Werte in Klammern) zusammengestellt. Die Zemente wurden den Hauptzementarten CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV und CEM V bzw. den Festigkeitsklassen 32,5, 42,5 und 52,5 zugeordnet. Aus der Tafel geht hervor, dass die Anzahl der zertifizierten inländischen Zemente seit 2002 um 20 auf 492 zugenommen hat. In den Zahlen sind neben 401 Zementen aus 49 Werken in den alten

Bundesländern insgesamt 91 Zemente aus 7 Werken in den neuen Bundesländern enthalten. Außerdem wurden 12 Herstellerdepots im In- und Ausland in die Überwachung einbezogen und von insgesamt 26 Zementen, die dort versendet werden, Proben entnommen.

Erstmals seit 1995 wurde wieder ein signifikanter Zuwachs der Versandmengenanteile von Portlandzement CEM I bei gleichzeitiger Abnahme der Versandmengenanteile von Hochofenzement CEM III verzeichnet. Andererseits hat die Anzahl der zertifizierten Portlandzemente ab- und

Tafel IV-2: Übersicht über die von der Überwachungsgemeinschaft des VDZ im Jahr 2004 zertifizierten bzw. überwachten Zemente und hydraulischen Bindemittel

Bindemittel	Norm / Regelwerk	Geltungsbereich	Art der Zertifizierung	Zertifizierungsstelle	Überwachungsstelle	Anzahl Bindemittel	Anzahl Werke
Zement	EN 197-1	EU	gesetzlich	VDZ	VDZ	494	64
	DIN 1164 ¹⁾	Deutschland					
	DIN 1164	Deutschland					
	Zulassung	Deutschland					
	ZTV Beton	Deutschland	privatrechtlich	-	VDZ	56	39
	BRL 2601, NEN 3550	Niederlande		BMC	VDZ	96	25
	TRA 600, PTV 603, NBN B 12	Belgien		VDZ	VDZ	33	14
	Reglement NF	Frankreich		AFNOR	VDZ	22	8
Putz- und Mauerbinder	DIN 4211	Deutschland	gesetzlich	VDZ	VDZ	24	19
	BRL 2603	Niederlande	privatrechtlich	BMC	VDZ	5	3
hydraulischer Tragschichtbinder	DIN 18506	Deutschland	(gesetzlich)	VDZ	VDZ	12	10

¹⁾ auf Antrag zusätzlich EG-Konformitätszertifikat nach EN 197-1 bzw. Übereinstimmungszertifikat nach DIN 1164

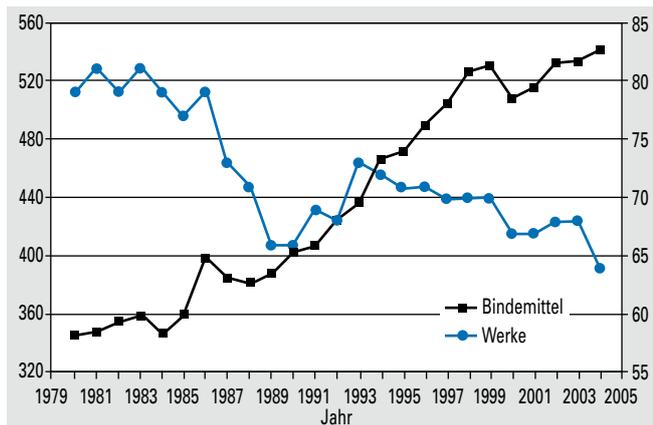


Bild IV-3: Entwicklung der von der Überwachungsgemeinschaft des VDZ fremdüberwachten Bindemittel und Werke

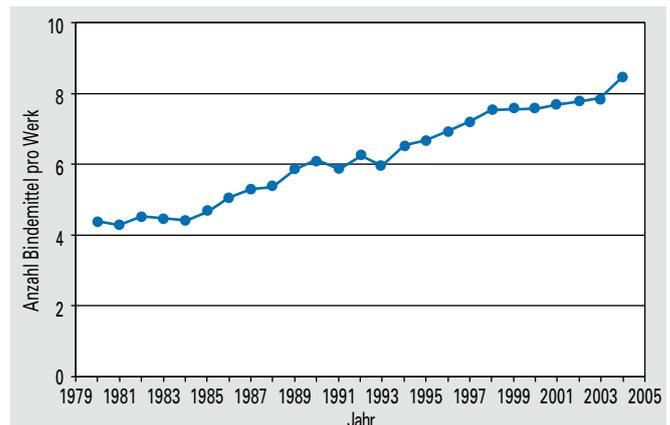


Bild IV-4: Mittlere Anzahl überwachter Bindemittel pro Werk für die von der Überwachungsgemeinschaft des VDZ überwachten Werke

die der Hochofenzemente zugenommen. Auffällig war außerdem eine deutliche Verschiebung der Versandmengenanteile von Zementen der Festigkeitsklasse 32,5 hin zu Zementen der Festigkeitsklassen 42,5 bzw. 52,5.

Im Jahr 2004 wurden auch 56 Zemente mit Verwendungsgenehmigung für Betonfahrbahnen überwacht. Weiterhin überwachte die Überwachungsgemeinschaft des VDZ in 2004 noch 24 Putz- und Mauerbinder nach DIN 4211, wovon 5 auf die Klasse MC 12,5 entfielen, sowie 12 hydraulische Boden- und Tragschichtbinder nach DIN 18506.

Fremdüberwachung von Zement nach freiwilligen Regelwerken

Zwischen der Überwachungsgemeinschaft des VDZ und den entsprechenden belgischen, französischen und niederländischen Stellen bestehen seit vielen Jahren bilaterale Vereinbarungen über die gegenseitige Anerkennung von Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungstätigkeiten. Hierbei handelt es sich um Fremdüberwachung nach freiwilligen Regelwerken, die über den gesetzlich geforderten Rahmen hinausgeht. Die Überwachungsgemeinschaft des VDZ führt in Absprache mit der entsprechenden ausländischen Stelle bei deutschen Herstellern die erforderlichen ergänzenden Prüfungen und Überwachungen durch. Dadurch lassen sich zusätzliche Werksbesuche und Prüfungen vermeiden, wodurch sich der Aufwand für die Zementhersteller reduziert. Mit

der niederländischen Zertifizierungsstelle Stichting BMC wurde im Berichtszeitraum eine weitere Vereinbarung geschlossen, die es dem Forschungsinstitut ermöglicht, auch als Unterauftragnehmer von BMC Prüftätigkeiten für niederländische Kunden durchzuführen.

Derzeit werden von der Überwachungsgemeinschaft des VDZ 96 Zemente und 5 Putz- und Mauerbinder zusätzlich nach niederländischen Beurteilungskriterien (BRL) überwacht und die Zertifikate durch BMC ausgestellt.

Für den Erhalt des belgischen BENOR-Zeichens sind 12 statt 6 Fremdüberwachungsprüfungen pro Jahr durchzuführen. Auch bestehen zusätzliche Anforderungen an das Erstarrungsende und den Siebrück-

Tafel IV-3: Anzahl der von der Überwachungsgemeinschaft des VDZ im Jahr 2004 (2002) zertifizierten inländischen Zemente

Zement	Anzahl der Zemente				Anteil am Zementversand (Inland) in M.-%			
	32,5	42,5	52,5	Summe	32,5	42,5	52,5	Summe
Portlandzement CEM I	62 (70)	86 (87)	57 (57)	205 (214)	23,0 (23,5)	28,3 (24,5)	7,3 (5,9)	58,6 (53,9)
Portlandkompositzement CEM II	85 (83)	42 (39)	14 (12)	141 (134)	22,1 (24,9)	7,5 (5,8)	1,4 (1,3)	31,0 (32,0)
Hochofenzement CEM III	97 (92)	39 (25)	7 (5)	143 (122)	8,3 (11,2)	1,9 (2,4)	0,2 (0,2)	10,4 (13,8)
Puzzolanzement CEM IV	2 (2)	- (-)	- (-)	2 (2)	0,0 (0,2)	- (-)	- (-)	0,0 (0,2)
Kompositzement CEM V	- (-)	- (-)	1 (-)	1 (-)	- (-)	- (-)	0,0 (-)	0,0 (-)
Summe	246 (247)	167 (151)	79 (74)	492 (472)	53,4 (59,8)	37,7 (32,7)	8,9 (7,4)	100,0 (99,9)
Zemente mit hoher Anfangsfestigkeit	138 (144)	101 (107)	48 (48)	287 (299)	44,7 (49,3)	30,9 (27,6)	7,4 (6,3)	83,0 (83,1)
Zemente mit üblicher Anfangsfestigkeit	108 (103)	66 (44)	31 (26)	205 (173)	8,7 (10,5)	6,8 (5,1)	1,5 (1,2)	17,0 (16,9)
Zemente mit Sondereigenschaften (NW, HS, NA)	70 (80)	34 (30)	5 (3)	107 (113)	keine Angaben			

stand von Zementen. In mehreren Teilen der NBN B12 sind Anforderungen an Zemente mit besonderen Eigenschaften festgelegt. Die Überwachungsgemeinschaft des VDZ zertifiziert und überwacht derzeit 33 Zemente zusätzlich nach belgischen Regelwerken.

In Frankreich besteht ein Reglement für die Vergabe des NF-Zeichens. Hierin ist festgelegt, dass 12 Fremdüberwachungsprüfungen pro Jahr durchzuführen sind. Mit der französischen Zertifizierungsstelle AFNOR wurde vereinbart, dass die Überwachungsgemeinschaft des VDZ im Unterauftrag von AFNOR die Fremdüberwachungsprüfungen und die Werksbesuche in deutschen Zementwerken durchführt. Die Überwachungsgemeinschaft prüft und überwacht derzeit 22 Zemente mit NF-Zeichen aus 8 Herstellwerken.

Weitere Bauprodukte

Der Tätigkeitsschwerpunkt der Überwachungsgemeinschaft des VDZ erstreckt sich nach wie vor auf die Prüfung, Überwachung und Zertifizierung von Zement und zementartigen Bindemitteln. Zunehmend werden jedoch auch andere Überwachungsaufträge bearbeitet. So wurden im Berichtszeitraum unter anderem 30 Pigmente durch die Überwachungsgemeinschaft geprüft und überwacht. Mitarbeiter des Forschungsinstituts waren auch in die Fertigstellung der Pigmentnorm DIN EN 12878 in allen Sprachfassungen eingebunden. Die Endabstimmung als harmonisierte Norm wird im Jahr 2005 erfolgen.

Weiterhin wurden verschiedene Auftragsprüfungen, wie z. B. Eignungsprüfungen an Einpressmörteln oder Prüfungen nach ASTM, durchgeführt.

Vergleichsprüfungen

Die europäische Überwachungsnorm für Zement EN 197-2 fordert, dass mit der Durchführung von Fremdüberwachungsprüfungen beauftragte Prüfstellen an regelmäßigen Vergleichsprüfungen teilnehmen. Auch aus der Akkreditierung der Prüflaboratorien des Forschungsinstituts nach ISO 17025 ergibt sich die Forderung nach der regelmäßigen Teilnahme an Vergleichsprüfungen. Seit 1988 nimmt das Labor des Forschungsinstituts als anerkannte Prüfstelle für Zement nach NEN 3550 an wöchentlichen Vergleichsversuchen mit einem niederländischen Referenzzement teil. Die Versuche werden von der Stichting BMC organisiert und viermal jährlich ausgewertet. Einmal jährlich findet ein Erfahrungsaustausch der Pilotlaboratorien statt, bei dem die Ergebnisse der Vergleichsprüfungen und die Ursachen für mögliche Unterschiede in den Prüfergebnissen besprochen werden. Darüber hinaus nimmt die Prüfstelle des VDZ an der jährlich durchgeführten Zement-Vergleichsprüfung der Association Technique de L'Industrie des Liants Hydrauliques (ATILH) teil, an der sich regelmäßig etwa 180 Prüflaboratorien beteiligen. Zur frühzeitigen Erkennung von Fehlerquellen bei der Zementprüfung werden, insbesondere mit Mitgliedswerken, zahlreiche weitere Ringversuche jährlich durchgeführt.

Prüflabor

Im Zusammenhang mit Fremdüberwachungsprüfungen sowie Auftrags- und Vergleichsprüfungen werden jährlich etwa 3500 Bindemittelproben in den Laboren des Forschungsinstituts geprüft. Bei im Mittel etwa 10 zu prüfenden Eigenschaften entspricht das rund 35000 Einzelprüfungen. Bei diesem hohen Probendurchsatz sind einerseits rationelle Prüfabläufe unerlässlich, andererseits müssen ein konstantes Prüfniveau und eine hohe Prüfqualität sichergestellt werden.

Die physikalischen Prüfungen werden in einem Prüflabor durchgeführt, das 1996 vollständig neu eingerichtet und seitdem ständig optimiert und ergänzt wurde. Durch eine hohe Vereinheitlichung der Prüfabläufe konnte trotz wechselnder Personalbesetzung eine gleich bleibende Prüfqualität sichergestellt werden. Die chemischen Prüfungen werden in der Abteilung Zementchemie des Forschungsinstituts durchgeführt. Hier wurden unter anderem Vorbereitungen getroffen, eine wesentlich höhere Anzahl an Hydratationswärmebestimmungen durchzuführen (vgl. Kapitel III). Durch Umstellung auf die europäischen Normen für LH-Zemente erhöht sich die Häufigkeit der Fremdüberwachungsprüfungen von bisher zweimal auf sechsmal pro Jahr. Geplante Optimierungsmaßnahmen betreffen die Anpassung der Prüfverfahren an die Vorgaben der neuen EN 196 und eine Einbindung der Datenbank in das hausübergreifende LIMS-System (vgl. Kapitel 0).

Qualitätssicherung

Seit April 2001 dürfen CE-gekennzeichnete Normalzemente uneingeschränkt auf dem europäischen Binnenmarkt in Verkehr gebracht werden. Die Überwachung der Zemente erfolgt nach der europäischen Überwachungsnorm EN 197-2. Zusätzlich existieren ein CEN-Bericht und Auslegungen der notifizierten Stellen, die eine einheitliche Anwendung der Überwachungsnorm durch unterschiedliche Stellen in Europa ermöglichen. Damit liegt, anders als bei vielen anderen Baustoffen, ein in sich geschlossenes Regelwerk für die Durchführung der Überwachung vor. Die bisher vorliegenden Erfahrungen mit der Anwendung dieser Regelwerke sind durchweg positiv.

Überwachung von weiteren Baustoffen

Die Überwachungsnorm EN 197-2 ist so geschrieben, dass sie nicht nur für Normalzemente nach EN 197-1, sondern auch für weitere Zemente heranzuziehen ist. So sind im Berichtszeitraum weitere Produktnormen für Zemente mit besonderen Eigenschaften sowie eine Norm für Putz- und Mauerbinder hinzugekommen, für die die EN 197-2 angewandt wird (siehe nachfolgender Unterabschnitt „Normung“). Als Verfahren der Konformitätsbescheinigung ist das System 1+, die höchste nach Bauproduktenrichtlinie mögliche Nachweisstufe vorgegeben (Tafel IV-4). Für hydraulische Tragschichtbinder und für Baukalk sind auf europäischer Ebene die Systeme 2+ bzw. 2, und damit keine Produktzertifizierung, vorgesehen.

Für reaktive Zusatzstoffe ist wie bei Zement das System 1+ anzuwenden. Im Berichtszeitraum wurde eine Überwachungsnorm für Flugasche EN 450-2 fertig gestellt, eine weitere für Silicastaub EN 13263-2 befindet sich in der Abstimmung, eine dritte für gemahlenem Hüttensand EN 15167-2 ist in Vorbereitung. Alle 3 Überwachungsnormen sind weitgehend identisch mit der EN 197-2. Spezifische Unterschiede bestehen hauptsächlich bei der Auslegung des Begriffs „Werk“ und bei der Prozesslenkung. Im Berichtszeitraum wurden weiterhin harmonisierte Normen für Zusatzmittel und Gesteinskörnungen fertig gestellt.

Tafel IV-4: Systeme der Konformitätsbescheinigung nach EU-Bauproduktenrichtlinie und zugehörige Überwachungsnormen für Betonausgangsstoffe

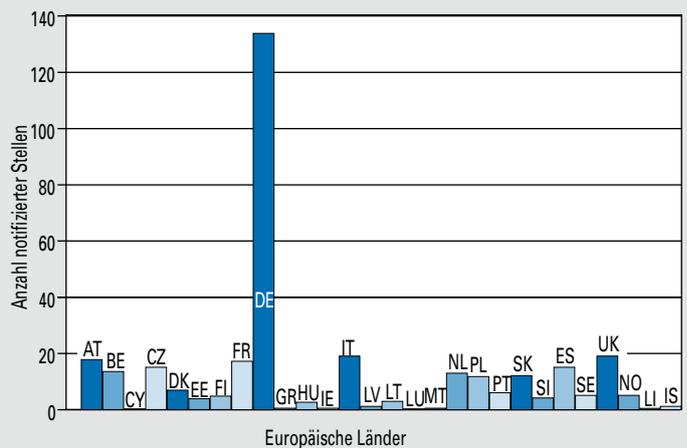
System	Konformitätsbescheinigung	Aufgaben der anerkannten Stelle	Überwachungsnorm	Betonausgangsstoffe
1 +	Zertifizierung durch Zertifizierungsstelle	Fremdüberwachung mit Stichprobenprüfung	EN 197-2	Zement ¹⁾ PM-Binder
			EN 450-2	Flugasche
			EN 13263-2 ³⁾	Silicastaub
			EN 15167-2 ³⁾	gemahlener Hüttensand
1		Fremdüberwachung ohne Stichprobenprüfung	-	-
2 +	Konformitätserklärung des Herstellers	Erstinspektion und laufende Überwachung	EN 934-6	Zusatzmittel
			EN 13282 ²⁾	Tragschichtbinder
			EN 12620 et al. ²⁾	Gesteinskörnungen
2		nur Erstinspektion	EN 12878	Pigmente
3		nur Erstprüfung	EN 459-2	Baukalk
4		-	-	-

¹⁾ Normalzement, Zement mit besonderen Eigenschaften, Tonerdezement

²⁾ bei hohen Sicherheitsanforderungen, sonst System 4

³⁾ Norm in Abstimmung bzw. Vorbereitung

Bild IV-5: Anzahl Stellen in Europa, die nach EU-Bauproduktenrichtlinie anerkannt sind



Zusammenarbeit der anerkannten Stellen

Wie Bild IV-5 zeigt, gibt es in Europa inzwischen rund 335 notifizierte, d.h. durch die Behörden der Mitgliedsländer jeweils anerkannte Stellen im Geltungsbereich der EU-Bauproduktenrichtlinie. Davon kommen allein über 130 aus Deutschland. Bei dieser Vielzahl an Stellen, die aus Bereichen mit den unterschiedlichsten Traditionen und Erfahrungen stammen, ist es wichtig, dass die Normen und Regelwerke gleichartig ausgelegt und angewendet werden. Entsprechend dem Willen der EU-Kommission sollen die notifizierten Stellen die Zusammenarbeit untereinander selbst organisieren. Auf europäischer Ebene wurden hierzu verschiedene Gremien eingerichtet. Die Überwachungsgemeinschaft des VDZ arbeitet im Lenkungsgremium (Advisory Group) der notifizierten

Stellen, dem zugehörigen Spiegelgremium und der Sektorgruppe 02 „Zement, Beton, Mörtel, Zuschlag“ mit.

In der Sektorgruppe 02 wurden im Berichtszeitraum Auslegungen zu den Produktnormen für Baukalk, Zusatzmittel, Gesteinskörnungen und Mauermörtel erstellt. Auch wurde die Frage diskutiert, inwieweit für Zemente die europäischen Ringversuche der anerkannten Stellen koordiniert oder ggf. sogar durch einen einzigen europäischen Ringversuch ersetzt werden können. In der Advisory Group wurden unter anderem organisatorische Fragen, Details des Erfahrungsaustauschs der Stellen, Leitpapiere der EU-Kommission, horizontale Dokumente und bauprodukt-spezifische Auslegungen sowie CEN- und EOTA-Fragen diskutiert. In der kurzen Zeit des Bestehens des Gremiums wurde eine

für den Einzelnen kaum noch überschaubare Vielzahl an produktübergreifenden Interpretationen zu Überwachungsfragen erstellt. Im zugehörigen nationalen Spiegelgremium wurde auch der Stand des nationalen Akkreditierungsgesetzes beraten. Zu hoffen ist, dass durch dieses Gesetz eine bessere Koordinierung zwischen gesetzlich geregelter und nicht geregelter Bereich erreicht wird, und dass es zu Aufwandsentlastungen und einer Erhöhung der internationalen Akzeptanz kommt.

Chromatüberwachung

Am 17. Januar 2005 ist die Europäische Chromatrichtlinie in Kraft getreten. Darin wird der wasserlösliche Chromatgehalt von Zement begrenzt. Für die Durchführung der Chromatbestimmung wurde ein europäisches Prüfverfahren prEN 196-10 erarbeitet, das bisher als Normentwurf vorliegt. Über die analytischen Details des Prüfverfahrens wird ausführlich in Kapitel III berichtet.

Alle Fragen, die die Überwachung des Chromatgehalts betreffen, werden in einem normativen Anhang zu prEN 196-10 festgelegt. Dieser besitzt viele Ähnlichkeiten mit der Überwachungsnorm für Zement EN 197-2. Ein getrenntes Dokument wurde vor allem deshalb erstellt, weil es sich um unterschiedliche Rechtsbereiche handelt (Tafel IV-5). Die Überwachung nach EN 197-2 im Geltungsbereich der EG-Bauproduktenrichtlinie fällt in den Aufgabenbereich der Bauaufsicht, die des wasserlöslichen Chromatgehalts in den der Arbeitsschutzbehörden. Zur begrifflichen Abgrenzung wird in den englischen Fassungen zwischen „Conformity“ und „Compliance“ unterschieden, was in der deutschen Fassung nur unzureichend wiedergegeben werden kann.

Ähnlich wie die EN 197-2 enthält der Normentwurf Festlegungen zur werkseigenen Produktionskontrolle durch den Hersteller, zu den Aufgaben einer ggf. eingeschalteten Zertifizierungsstelle, zu den Übereinstimmungskriterien, zur Beurteilung der Übereinstimmung und zu den Maßnahmen bei Nichtübereinstimmung. Der Hersteller muss im Rahmen seiner werkseigenen Produktionskontrolle sicherstellen, dass der zulässige Chromatgehalt eingehalten wird. Hierzu muss er in seinem Werkqualitätsbandbuch die zugehörige Prozesslenkung insbesondere im Hinblick auf die Verwendung des Reduktionsmittels, die durchgeführten Prüfungen und sonstige Maßnahmen beschreiben. Mindestens einmal pro Monat hat er an einer Probe des versandbereiten Zements den Nachweis

Tafel IV-5: Unterschiede der Rechtsbereiche für die Überwachung von Zement nach EN 197-2 und von chromatreduziertem Zement nach prEN 196-10, Anhang 10

Norm	EN 197-2	prEN 196-10, Anhang A
Bewertung	Konformität (Conformity evaluation)	Übereinstimmung (Evaluation of the compliance)
Geltungsbereich	EU-Bauproduktenrichtlinie 89/106/EWG	EU-Chromatrichtlinie 2003/53/EC
Schutzziel	Sicherheit ¹⁾	Arbeitsschutz
Anforderung an	Festbeton	Frischbeton
Behörde	Bauaufsicht	Arbeitsschutzbehörden
Nachweis	CE (Notifizierte Stellen)	?

¹⁾ 6 wesentliche Anforderungen (Standicherheit, Brandschutz, Gesundheit, Nutzungssicherheit, Schallschutz, Wärmeschutz)

zu führen, dass der zulässige Chromatgehalt eingehalten wird. Mit zunehmender Lagerungsdauer kann die Wirksamkeit des Reduktionsmittels verloren gehen. Daher ist der Nachweis nicht direkt nach Probenahme, sondern am Ende der vom Hersteller deklarierten Haltbarkeitsdauer zu führen. Die Zementprobe ist vorher in vollständig luftdicht verschlossenen Behältern zu lagern.

Zertifizierung von Managementsystemen

Die Produktzertifizierung ist gesetzlich geregelt und verpflichtend. Demgegenüber erfolgt die Zertifizierung von Managementsystemen ausschließlich auf freiwilliger Basis. Auch sind der geforderte Detaillierungsgrad und die Bewertungsmethoden unterschiedlich. Bei der Produktzertifizierung steht stärker die Kontrolle der Einhaltung von inhaltlichen Vorgaben im Vordergrund. Die Systemzertifizierung hat eher Dialogcharakter und dient hauptsächlich der Optimierung des Systems in Hinblick auf formale Anforderungen. Die Methoden zum Aufbau solcher Systeme und zur Beschreibung der relevanten Prozesse in Handbüchern und anderen Dokumenten sind allerdings grundsätzlich gleich. Daher ist es üblich, die spezifischen Anforderungen an die werkseigene Produktionskontrolle einerseits und an Managementsysteme nach ISO 9001 oder ISO 14001 andererseits durch ein einziges so genanntes „integriertes“ Managementsystem zu berücksichtigen.

In Zusammenhang mit der erstmaligen Erstellung einer Überwachungsnorm für Zement EN 197-2 Mitte der 90er Jahre waren die Gemeinsamkeiten und spezifischen Unterschiede von Produkt- und Systemzertifizierungen intensiv diskutiert worden. Um mögliche Synergien zwischen der Produkt-

zertifizierung durch die Überwachungsgemeinschaft des VDZ und der Zertifizierung von Qualitätsmanagementsystemen nach ISO 9001 nutzen zu können, entschied man sich damals, eine Zertifizierungsstelle für Managementsysteme FIZ-Zert einzurichten. FIZ-Zert wurde erstmals im Jahr 1998 durch die TGA (Trägergemeinschaft für Akkreditierung) privatrechtlich akkreditiert. Im Berichtszeitraum wurde nun FIZ-Zert, 5 Jahre nach der Erstakkreditierung für QM-Systeme nach ISO 9001, re-akkreditiert.

Seit der Erstakkreditierung von FIZ-Zert hat eine Verschiebung der für die Unternehmen relevanten Themenstellungen stattgefunden. Inzwischen existieren genügend Erfahrungen und Routine mit der Handhabung von integrierten Managementsystemen, die gleichzeitig die Anforderungen an die werkseigene Produktionskontrolle nach EN 197-2 und an QM-Systeme nach ISO 9001 erfüllen. Andererseits werden Fragen des Umweltschutzes bei der Zementherstellung für die Unternehmen der Zementindustrie immer wichtiger (vgl. Kapitel II). Aus diesem Grunde hat FIZ-Zert im Berichtszeitraum die notwendigen internen Voraussetzungen geschaffen, um auch Umweltmanagementsysteme nach ISO 14001 zertifizieren zu können. Zusammen mit der Re-Akkreditierung für QM-Systeme im Jahr 2003 wurde FIZ-Zert erstmals für die Zertifizierung von UM-Systemen nach ISO 14001 akkreditiert. Somit können nunmehr auch integrierte QM-/UM-Managementsysteme zertifiziert werden. Bild IV-6 zeigt beispielhaft die Durchführung eines Systemaudits in einem Zementwerk.

Für die Unternehmen der Zementindustrie bekommen Fragen des CO₂-Emissionshandels eine zunehmende Bedeutung



Bild IV-6: Systembeauftragter des Werks und externer Auditor im Gespräch

(vgl. Kapitel II). Im Jahr 2004 mussten in allen Zementwerken mit Klinkerproduktion erstmals CO₂-Emissionen gemäß Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz (TEHG) verifiziert werden. FIZ-Zert war an den Verifizierungen von insgesamt 28 Zementwerks- und zum Teil auch Kalkwerksstandorten beteiligt.

Normung

Vor mehr als 30 Jahren wurde das europäische Zement-Normungsgremium CEN/TC 51 gegründet. Auslöser war eine Initiative der EU, Handelshemmnisse infolge unterschiedlicher Vorschriften und Normen in den EU-Mitgliedsländern abzubauen. In jahrelanger Detailarbeit wurden zunächst einheitliche Prüfvorschriften der Normenreihe EN 196 erarbeitet und in Ringversuchen erprobt. Parallel dazu begann man damit, eine Produktnorm für Normalzemente EN 197-1 vorzubereiten. Der Normungsauftrag sah vor, dass alle in Europa als traditionell und bewährt klassifizierten Zemente berücksichtigt werden sollten. Schließlich wurde Anfang der 90er Jahre mit der Erstellung einer Überwachungsnorm EN 197-2 begonnen. Seit der Fertigstellung von EN 197-1 und -2 zur Jahrtausendwende gelten in Europa einheitliche Festlegungen für Normalzemente. Mit dem CE-Zeichen gekennzeichnete Zemente können seitdem in allen Ländern der EU frei gehandelt werden. Anwendungsbeschränkungen ergeben sich lediglich aufgrund von Einschränkungen in den jeweiligen Betonnormen, die trotz Fertigstellung der EN 206 nach wie vor national ausgerichtet sind (vgl. Kapitel V). Die weiteren Normungsarbeiten konzentrieren sich derzeit auf die Vervollständigung der

vorhandenen Produkt- und Prüfnormen. Wie nachfolgend dargestellt, hat TC 51 im Berichtszeitraum allein 4 europäisch harmonisierte Zement- und Bindemittelnormen und 6 Prüfnormen entweder als Neufassung oder als überarbeitete Fassung fertig gestellt.

Die weltweit tätige Normenorganisation ISO, in der 146 Länder mitarbeiten, hat ebenfalls Prüfvorschriften für Zement veröffentlicht. Diese sind praktisch identisch mit den europäischen Normen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Federführung für die ISO-Normung von Zement bei dem europäischen Gremium CEN/TC 51 liegt. Dabei ist zu beachten, dass ISO-Normen orientierenden Charakter haben, während CEN-Normen verbindlich sind. Aufgrund der engen Anbindung an die ISO-Arbeit zeigten bei der letzten Sitzung von CEN/TC 51 die asiatischen Länder, insbesondere China, Japan und Korea, erstmals stärkeres Interesse, die Zusammenarbeit zu intensivieren. Rund zwei Drittel der Weltzementproduktion werden derzeit in Asien hergestellt; das ist knapp 4-mal so viel wie in ganz Europa. Allein China hat einen Anteil an der Weltproduktion von rund 42%. Die chinesische Zementproduktion ist damit rund 24-mal größer als die von Deutschland. Bei der letzten Sitzung von CEN/TC 51 wurde nun eine engere Zusammenarbeit mit dem ISO-Gremium TC 74 vereinbart, um den weltweiten Entwicklungen Rechnung zu tragen. Insbesondere Japan hat bei der Normung der Röntgenfluoreszenzanalyse als Prüfverfahren sehr wesentliche Vorarbeiten geleistet. Daher wurde vereinbart, dass diese Norm zum Anlass genommen wird, erstmals enger zu kooperieren.

LH-Zement statt NW-Zement

Im Berichtszeitraum fanden die Arbeiten an europäisch harmonisierten Normen für Zemente mit niedriger Hydrationswärme ihren Abschluss. Wie Tafel IV-6 zeigt, sind 3 europäische Normen als Ausgabe August 2004 erschienen, die Zemente mit niedriger Hydrationswärme behandeln. Die Anforderungen an Normalzemente mit niedriger Hydrationswärme werden in einer A1-Erweiterung der DIN EN 197-1 erfasst. Die Hydrationswärmeanforderung von ≤ 270 J/g entspricht den bisherigen deutschen Festlegungen. Allerdings wird diese zusätzliche Eigenschaft nunmehr mit den Buchstaben LH (für „Low Heat of Hydration“) statt mit NW gekennzeichnet.

In EN 197-4 wurden ausschließlich Hochofenzemente genormt. Sie unterscheiden sich in den Anforderungen an die Anfangsfestigkeiten von Normalzementen. Die niedrige Anfangsfestigkeit wird durch den Buchstaben „L“ gekennzeichnet. Diese Zemente können ebenfalls als LH-Zemente klassifiziert werden. In EN 14216 werden Zemente mit sehr niedriger Hydrationswärme VLH behandelt. Alle VLH-Zemente werden in die Festigkeitsklasse 22,5 eingestuft und dürfen eine Hydrationswärme von 220 J/g nicht überschreiten. Diese Zemente können vor allem in massigen Bauteilen verwendet werden. Tafel IV-7 gibt einen Überblick über die durch EN 197-4 und EN 14216 neu eingeführten Festigkeitsklassen von Zement.

Zemente mit hohem Sulfatwiderstand

Weder die Versuche, ein europäisches „Performance“-orientiertes Prüfverfahren für den Sulfatwiderstand zu entwickeln, noch die Versuche, einheitliche präskriptive Kriterien für die Normung von Zementen mit hohem Sulfatwiderstand aufzustellen, waren bislang erfolgreich. Zuletzt wurde 2001 ein europäischer Normentwurf für Zemente mit hohem Sulfatwiderstand von einer qualifizierten Mehrheit abgelehnt. Daraufhin waren alle Normungsaktivitäten bis auf weiteres ausgesetzt worden. Andererseits drängt die EU-Kommission darauf, die Vorgehensweisen zur Behandlung von Zementen mit hohem Sulfatwiderstand europäisch stärker zu vereinheitlichen. Insbesondere die sehr unterschiedlichen Festlegungen für puzzolanhaltige Zemente in den einzelnen EU-Ländern haben bislang die Erzielung eines tragfähigen Kompromisses verhindert (vgl. auch Kapitel III). Daher wurde im Berichtszeitraum ein europäisches Forschungsprogramm initiiert, um stärker die Schadensmechanismen zu untersuchen. Es ist aber schon jetzt erkennbar, dass sich

Tafel IV-6: Im Berichtszeitraum fertig gestellte Normen für Zemente mit besonderen Eigenschaften

	Norm	Ausgabe	Zement / Bindemittel	Bindemittelarten		Festigkeitsklasse	Zusätzliche Klassen
				Anzahl	Bezeichnung		
europäisch	DIN EN 197-1+A1	08/2004	Normalzement mit niedriger Hydratationswärme	27	CEM I CEM II CEM III CEM IV CEM V	32,5 N/R 42,5 N/R 52,5 N/R	LH (≤ 270 J/g)
	DIN EN 197-4	08/2004	Hochofenzement mit niedriger Anfangsfestigkeit	3	CEM III	32,5 L 42,5 L 52,5 L	LH (≤ 270 J/g)
	DIN EN 14216	08/2004	Zement mit sehr niedriger Hydratationswärme	6	VLH III/B VLH III/C VLH IV VLH V	22,5	VLH (≤ 220 J/g)
national	DIN 1164-10 ¹⁾	08/2004	Normalzement mit besonderen Eigenschaften	27	CEM I CEM II CEM III CEM IV CEM V	32,5 N/R 42,5 N/R 52,5 N/R	HS (hoher Sulfatwiderstand) NA (niedriger wirksamer Alkaligehalt)
	DIN 1164-11	11/2003	Zement mit verkürztem Erstarren				FE (frühes Erstarren) SE (schnell erstarrend)
	DIN 1164-12	6/2005	Zement mit erhöhtem Anteil an organischen Zusätzen				HO (erhöhter Anteil an organischen Zusätzen)

¹⁾ Ersatz für DIN 1164:2000

auf absehbare Zeit kein allgemein gültig anwendbares Performance-Prüfverfahren entwickeln lässt. Daher beschloss TC 51, parallel zu diesen Forschungsaktivitäten einen erneuten Versuch zu unternehmen, die wesentlichen HS-Zemente aufgrund von präskriptiven Kriterien europäisch zu normen.

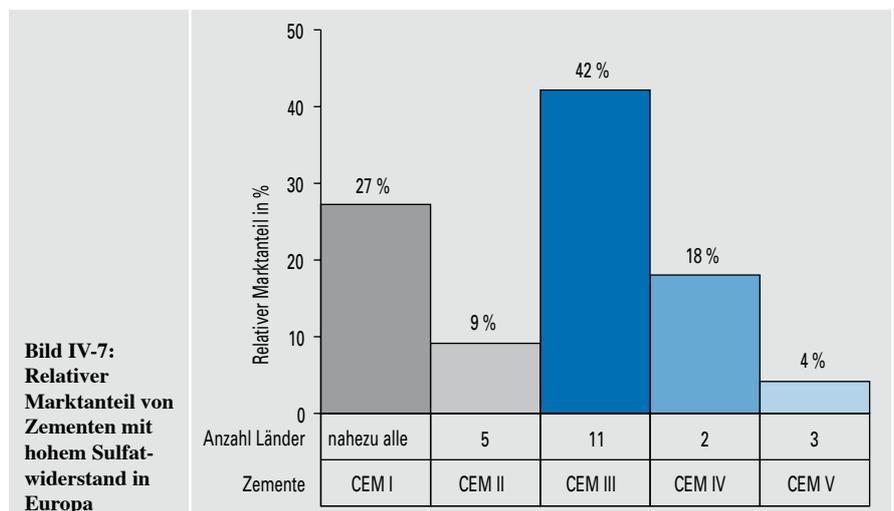
Die notwendigen Eingangsdaten liefert eine Cembureau-Erhebung über die Marktanteile in den einzelnen EU-Mitgliedsländern. Zemente mit hohem Sulfatwiderstand haben in Europa einen Marktanteil von gut 5%. Hierbei handelt es sich überwiegend um CEM I- und CEM III-Zemente, die in den meisten Ländern hergestellt werden und zusammen einen Marktanteil von rd. 70% haben (Bild IV-7). Obwohl CEM IV-Zemente mit HS-Eigenschaft nur in 2 Ländern hergestellt werden, verfügen sie über einen relativen Marktanteil von 18%. In einigen wenigen Ländern gibt es darüber hinaus Festlegungen für CEM II- und CEM V-Zemente als HS-Zemente.

Weitere europäische Zementnormen

Im Berichtszeitraum wurde die Tonerdezementnorm prEN 14647 fertig gestellt und das Abstimmungsverfahren als harmonisierte europäische Norm eingeleitet. Die Norm enthält in einem Anhang erläutern-

Tafel IV-7: Festigkeitsklassen von Zement

Festigkeitsklasse	Norm	Druckfestigkeit in MPa			
		Anfangsfestigkeit		Normfestigkeit	
		2 Tage	7 Tage	28 Tage	
22,5	DIN EN 14216	-	-	≥ 22,5	≤ 42,5
32,5 L	DIN EN 197-4	-	≥ 12	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5 N	DIN EN 197-1	-	≥ 16		
32,5 R		≥ 10	-	≥ 42,5	≤ 62,5
42,5 L	DIN EN 197-4	-	≥ 16		
42,5 N	DIN EN 197-1	≥ 10	-	≥ 52,5	-
42,5 R		≥ 20	-		
52,5 L	DIN EN 197-4	≥ 10	-	≥ 52,5	-
52,5 N	DIN EN 197-1	≥ 20	-		
52,5 R		≥ 30	-		



Tafel IV-8: Stand der von CEN/TC 51 erarbeiteten Prüfnormen

Prüfverfahren für Zement	Norm	Gültige Fassung	Stand
Bestimmung der Festigkeit	EN 196-1	2-2005	-
Chemische Analyse von Zement	EN 196-2 ¹⁾	2-2005	
Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit	EN 196-3	2-2005	
Puzzolanität von Puzzolanementen	EN 196-5	2-2005	
Bestimmung der Mahlfeinheit	EN 196-6	12-1989	Erste Überarbeitung, Vorbereitung für CEN-/ISO-Umfrage
Verfahren für die Probenahme und Probenauswahl von Zement	EN 196-7	12-1989	
Hydratationswärme – Lösungsverfahren	EN 196-8	10-2003	-
Hydratationswärme – Teiladiabatisches Verfahren	EN 196-9	10-2003	
Bestimmung des Gehalts an wasserlöslichem Chrom (VI) im Zement	prEN 196-10	2-2005	CEN-Umfrage
Chemische Analyse mit Röntgenfluoreszenz	EN 196-2.2	-	In Arbeit
Methoden für die Bestimmung des C ₃ A-Gehalts von Zement	offen	-	In Erwägung
Quantitative Bestimmung der Bestandteile	CEN-Report ²⁾	-	Veröffentlichung 2005
Bestimmung des Gesamtgehalts an organischem Kohlenstoff in Kalkstein	EN 13639	07-2002	-
Prüfung von Festbeton – Frost-Tausalz-Widerstand – Teil 9: Abwitterung	prCEN/TS 12390-9	-	Fertig für formelle Abstimmung als CEN/TS
Prüfung von Festbeton – Frost-Tausalz-Widerstand – Innere Gefügestörung	prCEN/TR 15177	-	CEN Technischer Bericht ist abgeschlossen Veröffentlichung 2005
Bestimmung des Einflusses von Zement auf die Auslaugung von erhärteten Mörtel und Beton	EN yyy	-	Noch nicht angefangen

¹⁾ Neufassung von EN 196-2 enthält auch die Festlegungen der früher gültigen EN 196-21 „Bestimmung des Chlorid-, Kohlenstoffdioxid- und Alkalianteils von Zement“

²⁾ ersetzt ENV 196-4

de Hinweise, worauf bei der Verwendung von Tonerdezement in Beton und Mörtel zu achten ist. Dadurch soll sichergestellt werden, dass bei der Verwendung von Tonerdezement dessen besondere Eigenschaften berücksichtigt werden. Unabhängig davon besteht in den Gremien der Bauaufsicht und Normung Einigkeit darüber, Tonerdezement in Deutschland nach wie vor für tragende Bauteile auszuschließen.

In 2005 steht eine erste Überarbeitung der Norm für Normalzemente EN 197-1 an. Es ist vorgesehen, die grundsätzliche Struktur der Norm nicht zu verändern und lediglich kleinere Aktualisierungen vorzunehmen. Weiterhin beschloss CEN/TC 51, eine europäische Norm für Sulfathüttenzement zu erstellen, da es vereinzelt Anwendungen für diese Zemente in Europa gibt.

Nationale „Restnorm“ DIN 1164

Zemente mit besonderen Eigenschaften werden weiterhin in der nationalen „Restnorm“ DIN 1164 behandelt. Nunmehr besteht sie jedoch nicht mehr aus 1, sondern aus 3 Teilen. In einem Teil 10, der die Ausgabe 2000 der DIN 1164 ersetzt, werden nur noch die zusätzlichen Anforderungen für HS- und NA-Zemente beschrieben. Die Festlegungen für NW-Zemente wurden durch diejenigen für LH-Zemente in

EN 197-1 ersetzt. Wenn Normalzemente HS- oder NA-Eigenschaften besitzen, müssen sie weiterhin als DIN 1164-Zement gekennzeichnet und überwacht werden. Zemente nach DIN 1164-10 erfüllen grundsätzlich alle Anforderungen der DIN EN 197-1.

Die Produktentwicklungen in der Zementindustrie haben gezeigt, dass einige Zemente mit besonderen Eigenschaften durch die vorliegenden Normen nicht erfasst werden. Diese Zemente bedurften bislang einer aufwendigen bauaufsichtlichen Zulassung. Aufgrund der inzwischen vorliegenden langjährigen Erfahrungen mit diesen Zementen wurden in einem Teil 11 der DIN 1164 Zemente mit verkürzten Erstarrungszeiten und einem Teil 12 Zemente mit einem erhöhten Anteil an organischen Zusätzen (HO) genormt. In Teil 11 wird hinsichtlich des Erstarrungsverhaltens zwischen Zementen mit frühem Erstarren (FE-Zement) und schnell erstarrenden Zementen (SE-Zement) unterschieden. Bis auf das Erstarrungsverhalten bzw. den Gehalt an Zusätzen entsprechen diese Zemente der DIN EN 197-1. Die DIN 1164-11 macht keine Einschränkungen hinsichtlich der Zementarten. Die Bauaufsicht möchte jedoch die Anwendung von SE-Zementen mit der Begründung einschränken, dass bisher nur

Erfahrungen mit Portlandzementen vorliegen. Aus Sicht des Forschungsinstituts liegen jedoch keine technischen oder baupraktischen Gründe vor, die eine solche Einschränkung und damit den Ausschluss insbesondere von Portlandkompositzementen rechtfertigen.

Bindemittelnormen

Im Berichtszeitraum wurden die Arbeiten an einer europäisch harmonisierten Putz- und Mauerbindernorm DIN EN 413-1 abgeschlossen. Die Norm wurde als Ausgabe Mai 2004 veröffentlicht. Sie ersetzt die bisher gültige nationale Norm DIN 4211. Da in der DIN 4211 bereits 1995 große Teile der europäischen Tragschichtbindernorm berücksichtigt worden waren, sind die sich ergebenden Änderungen gering. Wesentliche Neuerung ist, dass nunmehr auch PM-Binder MC 22,5X genormt sind. Diese PM-Binder enthalten keine Luftporen bildenden Zusätze. 10 Jahre nach deren Erstveröffentlichung ist auch eine überarbeitete Prüfnorm EN 413-2 erschienen. Unter anderem wurden die Belastungsgeschwindigkeit bei Festigkeitsprüfung, die Prüfverfahren für das Erstarren und das Wasserrückhaltevermögen sowie das Kalibrierverfahren für das LP-Gerät modifiziert und die Genauigkeitswerte für die verschiedenen Prüfverfahren ergänzt.

Die nationale Norm für „Hydraulische Boden- und Tragschichtbinder“ DIN 18506 war zuletzt im Jahr 2002 überarbeitet worden. Dabei waren große Teile der entsprechenden Europäischen Vornorm ENV 13282 übernommen worden. Im Berichtszeitraum wurde nun mit der Umwandlung der europäischen Vornorm in eine europäisch harmonisierte Norm begonnen. Unterschiedlichen Traditionen insbesondere in Deutschland und Frankreich entsprechend soll zwischen 2 Arten von Tragschichtbindern unterschieden werden. Zum einen sollen Tragschichtbinder mit hoher Frühfestigkeit berücksichtigt werden, die sich hinsichtlich der Erhärtungscharakteristik nicht wesentlich von Normalzementen unterscheiden. Zum anderen sollen Tragschichtbinder mit sehr langsamer Erhärtung aufgenommen werden, die über die Festigkeit nach 56 Tagen charakterisiert werden. Bei letzteren können wahrscheinlich die Prüfverfahren nach EN 196 nicht vollständig angewandt werden und müssen entsprechend modifiziert werden.

Prüfnormen

Eine wesentliche Aufgabe von CEN/TC 51 ist nach wie vor die Erstellung bzw. Überarbeitung von Prüfnormen für Zement. **Tafel IV-8** gibt einen Überblick über den Stand der verschiedenen Prüfnormen.

15 Jahre nach der erstmaligen Veröffentlichung der physikalischen und chemischen Prüfverfahren EN 196-1, -2, -3 und -5 wurden im Jahr 2005 überarbeitete Fassungen veröffentlicht. Mit der Überarbeitung der Normen war vor knapp 10 Jahren begonnen worden. Sehr viele Detailpunkte waren dabei aufgrund der inzwischen vorliegenden Erfahrungen überprüft und ggf. angepasst worden, ohne an den Grundsätzen der Prüfverfahren etwas zu ändern. Unter anderem ist es gelungen, für die Mörtelverdichtung

Tafel IV-9: Vergleich der Fassungen 1994 und 2005 des Verfahrens für die Erstarrungsprüfung nach DIN EN 196-3

Änderungen	EN 196-3	
	Ausgabe 1994	Ausgabe 2004
Relative Luftfeuchte im Laborraum	mindestens 65 %	mindestens 50 %
Form Vicat-Ring	konisch, mit Nachweis auch zylindrisch	konisch oder zylindrisch
Herstellung des Zementleims	mit Nachweis auch z. B. Trinkwasser	destilliertes oder entionisiertes Wasser
Messung Normsteife	240 s	(240 ± 10) s
Messpunkt Normsteife	(6 ± 1) mm	(6 ± 2) mm
Zeitintervall bei der Herstellung des Zementleims	90 / 15 / 90 s	90 / 30 / 90 s
Lagerung der Prüfkörper	Feuchtkasten	unter Wasser
Lagerungstemperatur	(20 ± 1) °C	(20,0 ± 1,0) °C
Messpunkt Erstarrungsbeginn	(4 ± 1) mm	(6 ± 3) mm
Bestätigungsmessung Erstarrungsende	nicht erforderlich	2 weitere Messungen an anderer Stelle

den Vibrationstisch als gleichwertiges Alternativverfahren zum CEN-Schocktisch in die Norm aufzunehmen. Auch wurden in Bezug auf die Durchführung der Erstarrungsprüfung einige Details geändert (s. **Tafel IV-9**). Da sich in der Praxis immer wieder Schwierigkeiten in der Einhaltung der vorgeschriebenen Feuchtegehalte der Umgebungsluft ergeben hatten, wurde generell auf Unter-Wasser-Prüfung umgestellt.

Im Berichtszeitraum wurden die beiden Prüfnormen für die Hydrationswärmebestimmung, das Lösungsverfahren nach EN 196-8 und das teiladiabatische Verfahren nach EN 196-9, veröffentlicht. Gemäß den Festlegungen in den jeweiligen Produktnormen sind Prüfergebnisse, die nach EN 196-8 nach 7 Tagen und nach EN 196-9

nach 41 Stunden erzielt wurden, gleichwertig (vgl. auch Kapitel III). Des Weiteren wurde ein europäisches Prüfverfahren zur Bestimmung des wasserlöslichen Chromatgehalts erarbeitet. Da die Europäische Chromatrichtlinie am 17.1.2005 in Kraft trat, musste dieses Verfahren unter großem Zeitdruck fertig gestellt und in Ringversuchen erprobt werden. Über die Details des Normentwurfs wird ausführlich in Kapitel III berichtet, über den in der Norm enthaltenen Anhang über Übereinstimmungskriterien wird in dem Unterabschnitt „Qualitätssicherung“ dieses Kapitels berichtet. In Kooperation mit ISO/TC 74 wurden im Berichtszeitraum die Arbeiten zur Normung des Verfahrens der Röntgenfluoreszenzanalyse intensiviert, die in vielen Werken routinemäßig zur chemischen Analyse herangezogen wird (s. Kapitel III).



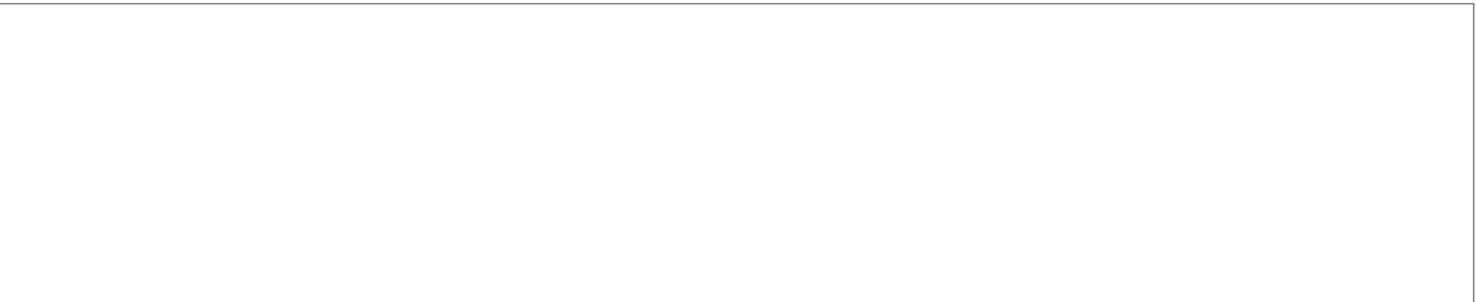
Betonausgangsstoffe und -technologie, Betonbautechnik

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 Hüttsand, 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 42,5 N/R	CEM I CEM II CEM III	-	16
	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 Anwendungsbereiche, 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 angewendeter 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 (Expositionsclassen 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

Bild V-1: Zeitliche Entwicklung der Carbonatisierungstiefen von Betonen unter Verwendung von Zementen mit unterschiedlichen Hauptbestandteilen

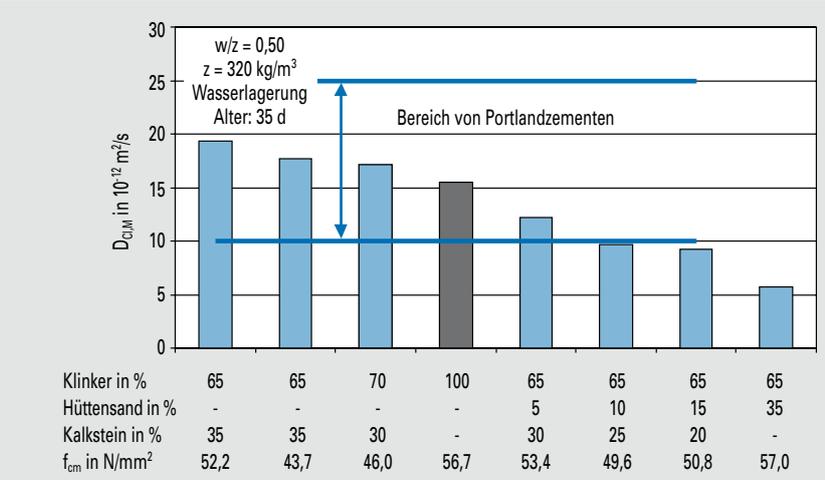
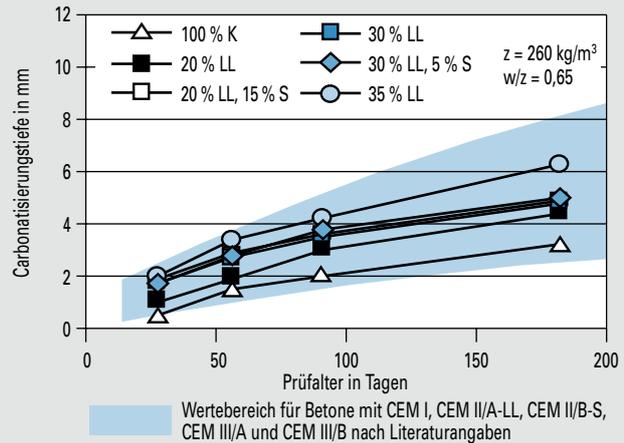


Bild V-2: Chloridmigrationskoeffizienten D_{C1,M} untersuchter Betone mit w/z = 0,50 und z = 320 kg/m³

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 kg/m³ 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_{C1,M} zwischen rd. 10 und 25 · 10⁻¹² m²/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.

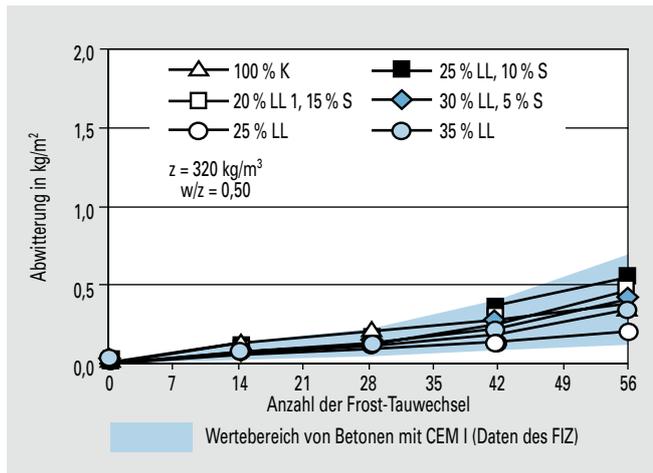


Bild V-3: Abwitterungen von Betonen unter Verwendung von Portlandzement und verschiedenen Portlandkompositzementen – CF-Test

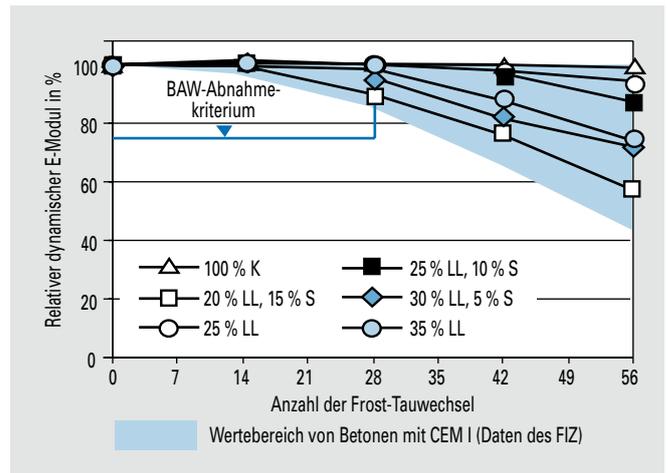


Bild V-4: Relativer dynamischer E-Modul von Betonen mit $z = 320 \text{ kg/m}^3$ und $w/z = 0,50$ unter Verwendung von Portlandzement und verschiedenen Portlandkompositzementen – CIF-Test (Abnahmekriterium der Bundesanstalt für Wasserbau: 75 % nach 28 Frost-Tauwechseln)

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-

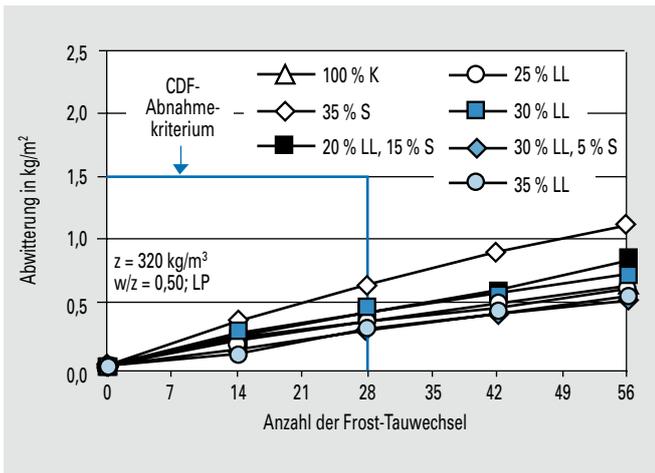


Bild V-5: Abwitterungen von Betonen unter Verwendung von Portlandzement und verschiedenen Portlandkompositementen – CDF-Test (Abnahmekriterium: 1,5 kg/m² nach 28 Frost-Tauwechseln)

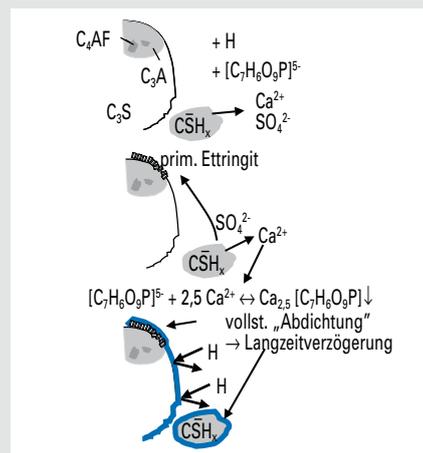


Bild V-6: Einfluss von LVZ auf die Hydratation von sulfatoptimiertem Portlandzement

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 Hydrationsfortschritt von C₃A bzw. C₄AF sowie die Reaktion von Halbhydrat mit Wasser zu Gips wurden stark verzögert. Enthalten die Gemische aus C₃A und Sulfatträger zusätzlich Calciumhydroxid, wurden mit Ausnahme der Bildung von primärem Ettringit alle weiteren Hydrationsreaktionen 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 Calciumaluminathydrate (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 Hydrationsprodukten sind, kann eine weitgehend geschlossene Belegung durch Calciumphosphonat erfolgen. Oberflächen, die zum Teil schon mit Hydrationsprodukten belegt sind, z. B. die des C₃A, weisen eine relativ große spezifische Oberfläche auf. Die Menge

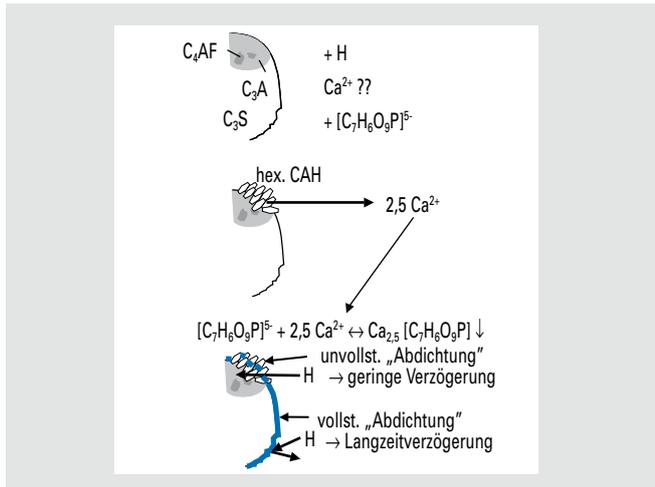


Bild V-7: Einfluss von LVZ auf die Hydratation von Portlandzement ohne Sulfatoptimierung

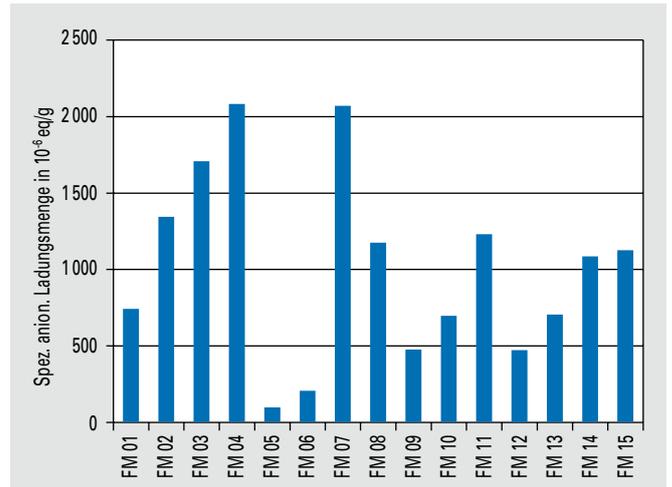


Bild V-8: Spezifische anionische Ladungsmenge von 15 handelsüblichen Fließmitteln auf Basis von PCE

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.

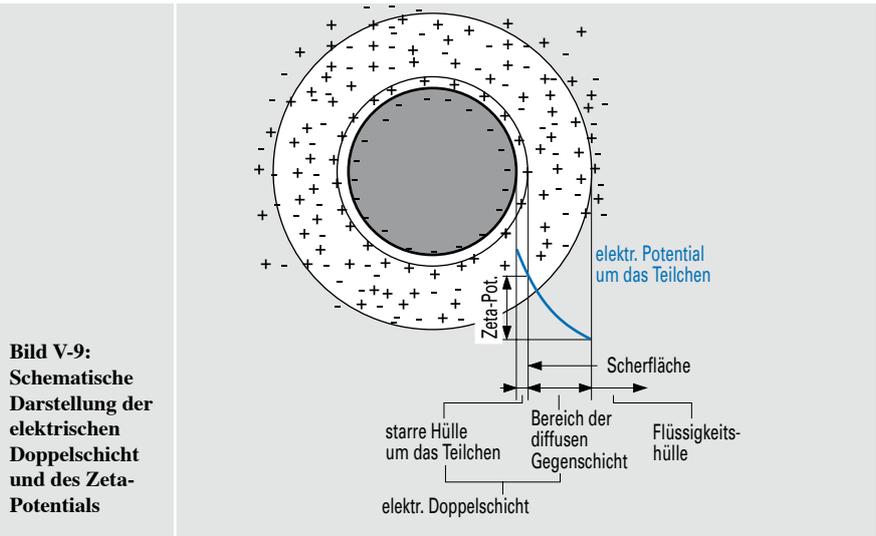
In einem von der AiF finanziell geförderten Forschungsvorhaben wird durch grundlagenorientierte Untersuchungen der Einfluss des chemischen Aufbaus der PCE-Moleküle und der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung handelsüblicher Zemente auf die Dispergierung und Festigkeitsentwicklung damit hergestellter 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.

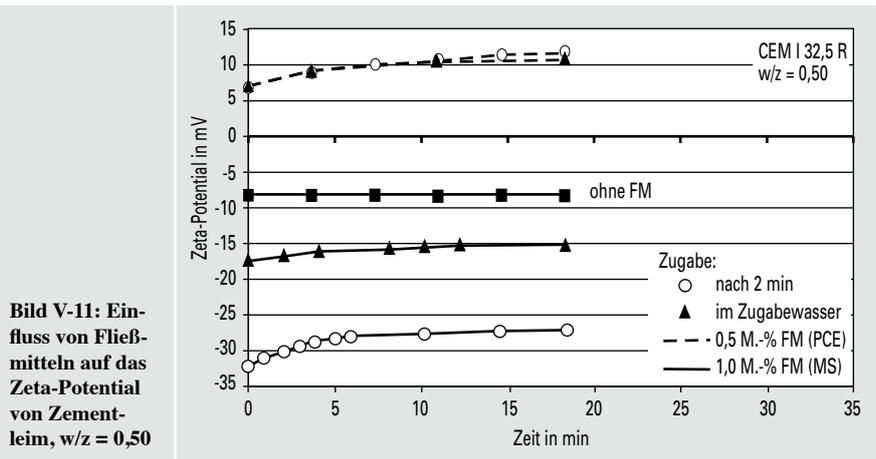


Bestimmung des Zeta-Potentials

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.



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 elektrophoretischen 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.



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 Burette 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-

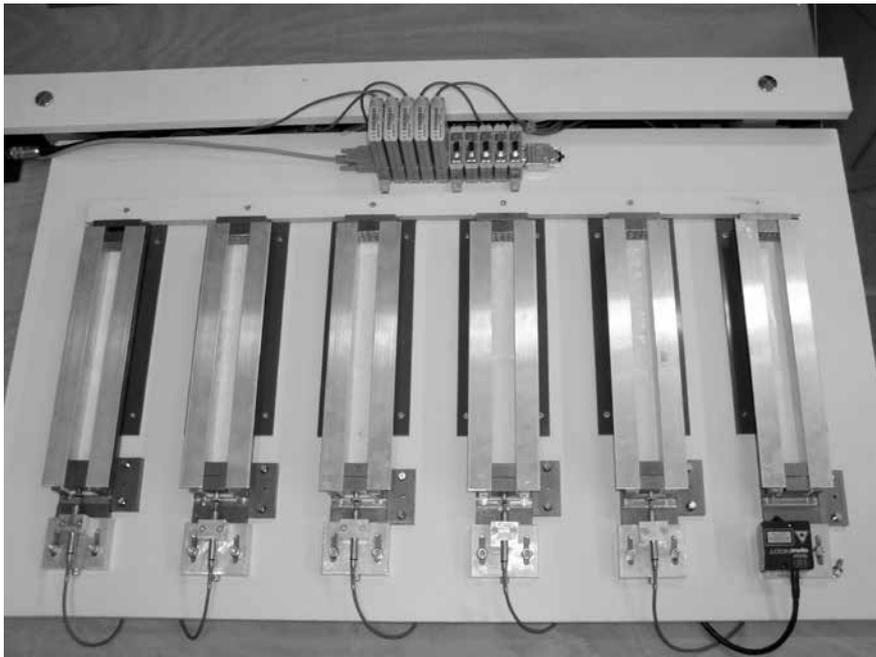


Bild V-12: Versuchseinrichtung zur kontinuierlichen Messung des autogenen Schwindens von Zementstein

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

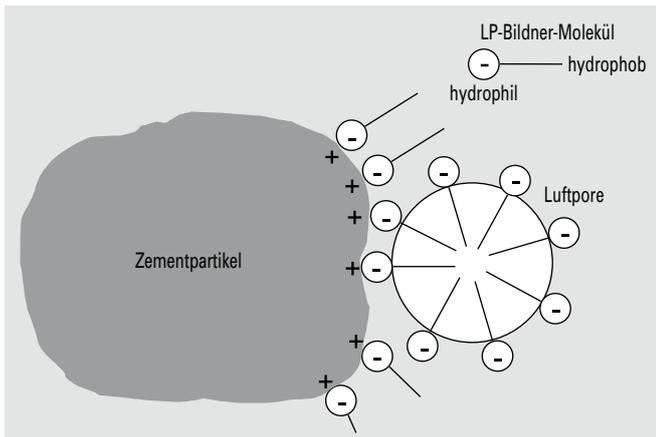


Bild V-13: Sorption der LP-Bildnermoleküle und Anheftung einer Luftpore an ein Zementpartikel

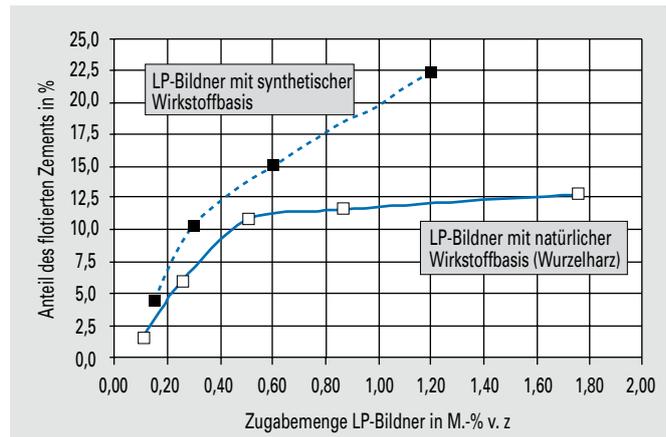


Bild V-14: Anteil des flotierten Zements in Abhängigkeit von der Zugabemenge und der Wirkstoffbasis zweier handelsüblicher Luftporenbildner

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.

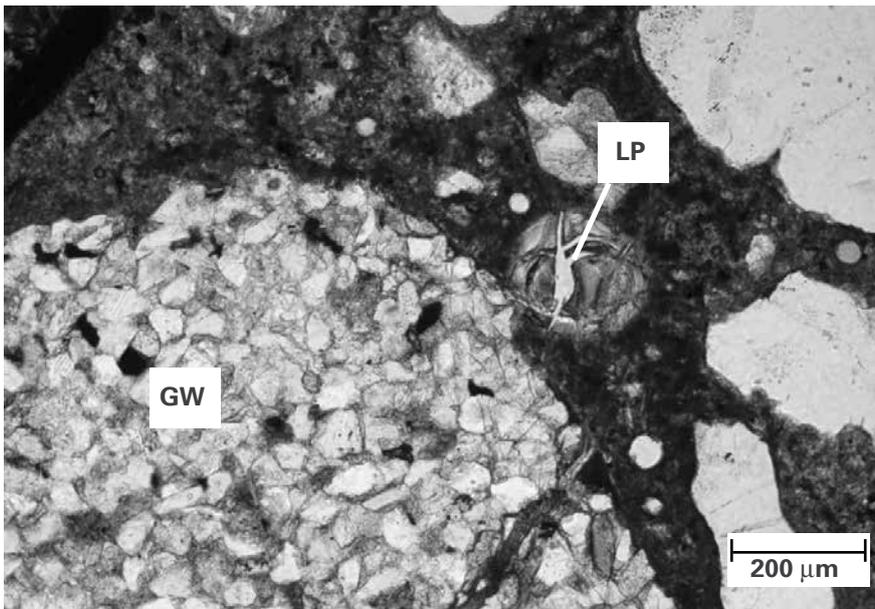


Bild V-15: Dünnschliff eines Betons mit gerissemen Grauwackekorn (GW) und gefüllter Luftpore (LP), Dünnschliff nach Lagerung des Betons in der 40-°C-Nebelkammer

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 Bohrkerne 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-

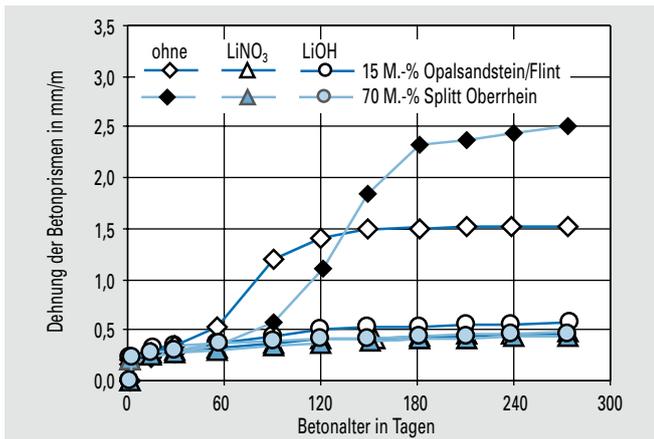


Bild V-16: Auswirkung von Lithiumnitrat ($[Li/(Na+K)]_{\text{molar}} = 0,8$) und Lithiumhydroxid ($[Li/(Na+K)]_{\text{molar}} = 1,0$) auf die Dehnung von Betonbalken ($10 \times 10 \times 50 \text{ cm}$) mit 500 kg/m^3 CEM I 32,5 R ($1,3 \text{ M.-% Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) und $w/z = 0,55$

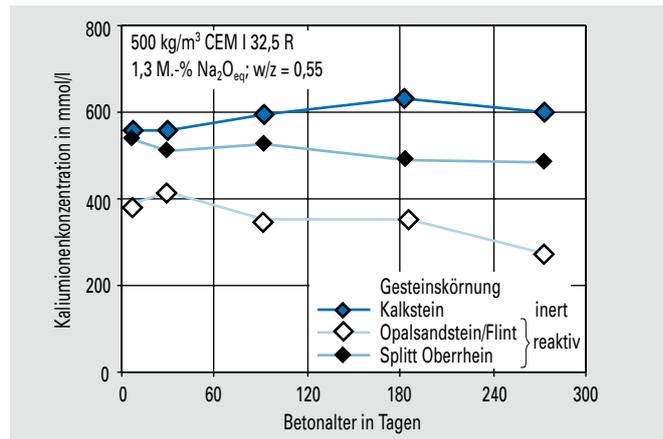


Bild V-17: Einfluss der Gesteinskörnung auf die Kaliumionenkonzentration der Porenlösung bei konservierter Lagerung in der 40°C -Nebelkammer

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 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ von $1,3 \text{ M.-%}$ (Prüfzement) verwendet und der Beton mit 500 kg/m^3 Zement hergestellt.

Anhand der Dehnung sowie des dynamischen E-Moduls von Balken mit den Abmessungen $10 \times 10 \times 50 \text{ cm}$ 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

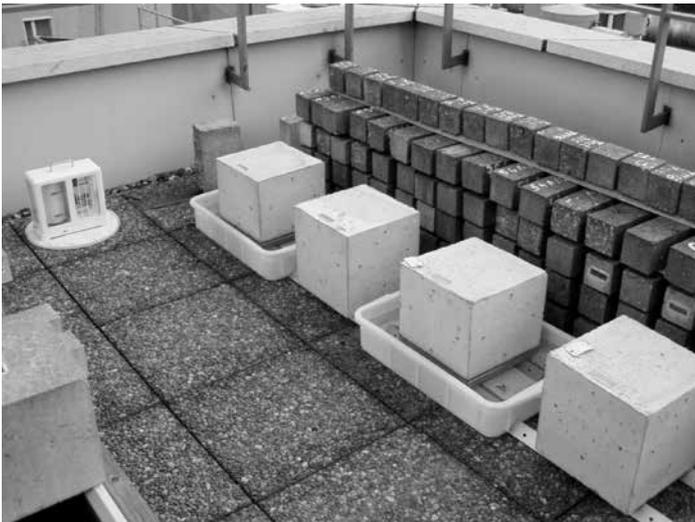


Bild V-18:
Luft- und
Fußbadlagerung
von 30-cm-
Würfeln
im Freien

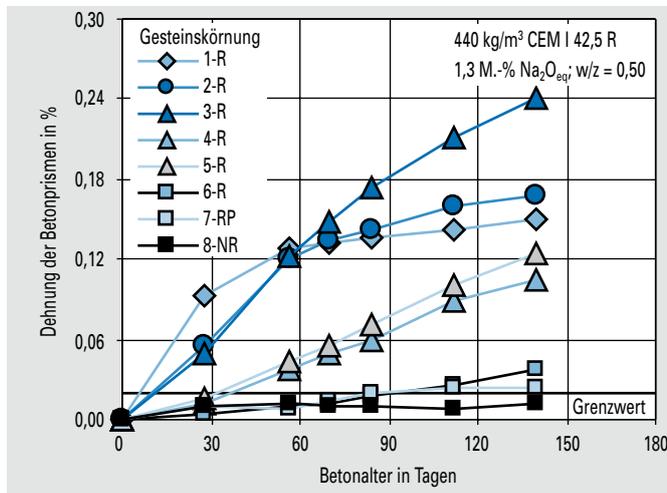


Bild V-19: Dehnung von Betonprismen (7,5 x 7,5 x 28 cm) mit verschiedenen Gesteinskörnungen (R = reaktiv; RP = reaktiv mit Pessim; NR = nicht reaktiv) beim 60-°C-Betonprüfverfahren (RILEM AAR-4)

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.

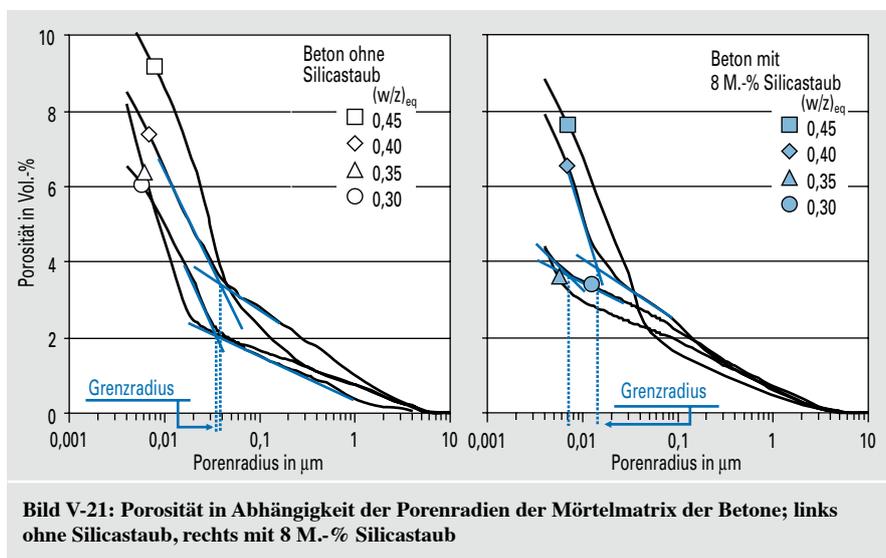
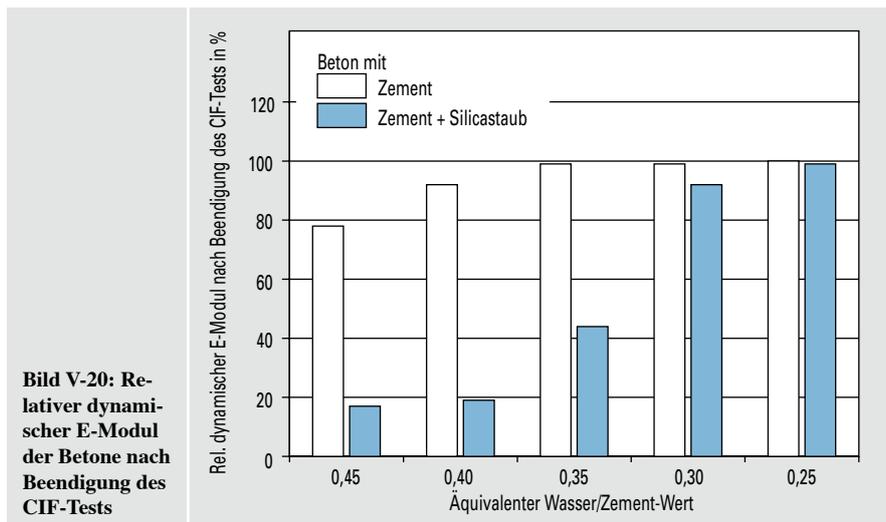
Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand

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

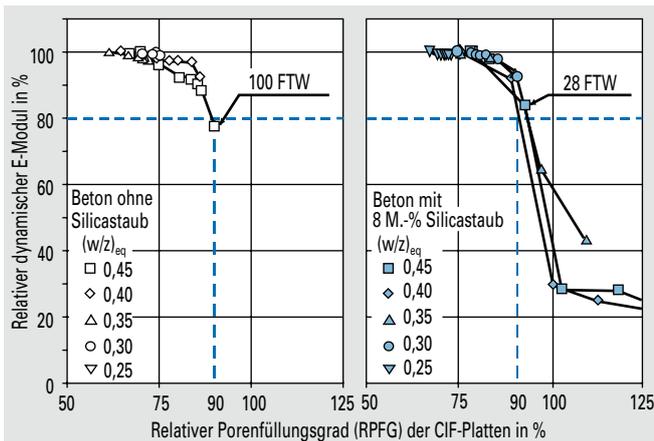


Bild V-22: Relativer dynamischer E-Modul in Abhängigkeit des relativen Porenfüllungsgrades der Betone; links ohne Silicastaub, rechts mit 8 M.-% Silicastaub (Ergebnisse des CIF-Tests von 0 bis max. 100 Frost-Tauwechsel [FTW])

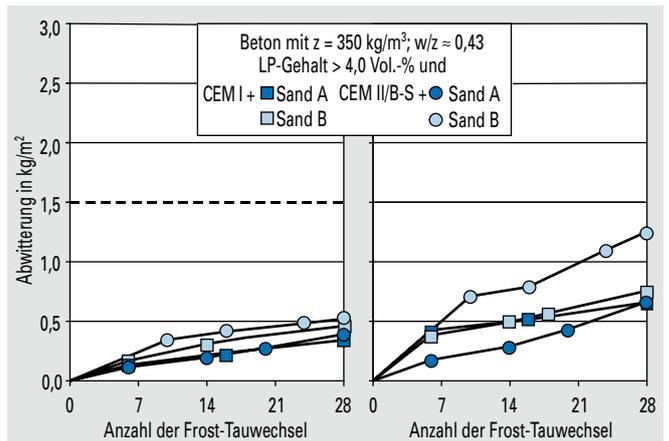


Bild V-23: Abwitterung in Abhängigkeit der Frost-Tauwechsel der Betone, bestimmt mit dem CDF-Verfahren; links normgemäße Nachbehandlung, rechts verkürzte Nachbehandlung

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 Porenradien.

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 Bohrkern, 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/m³, einem Wasser/Zement-Wert von 0,43 ± 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.

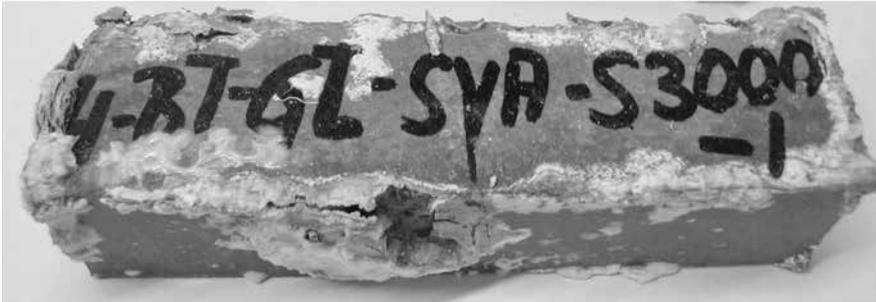


Bild V-25: Betonprüfkörper ($w/z = 0,60$) auf Basis von Portlandzement (CEM I 32,5 R) und Kalksteinsplitt nach 45 Monaten Lagerung in 0,44 %iger Natriumsulfatlösung bei 8 °C



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

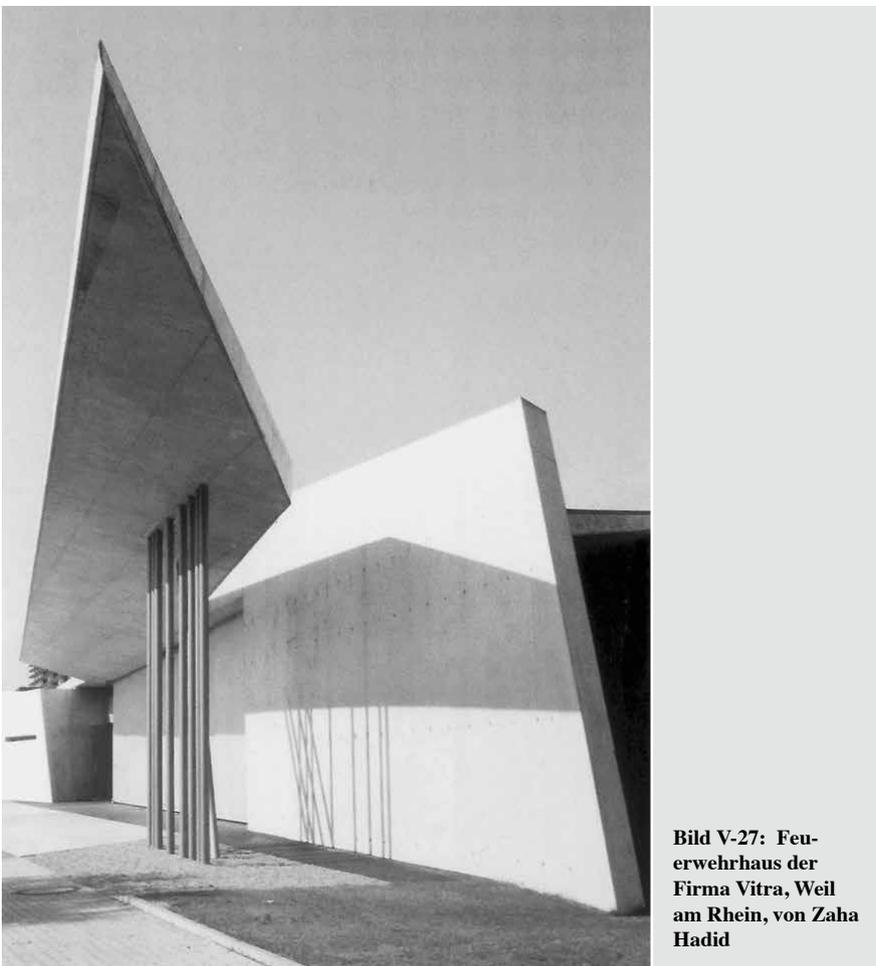


Bild V-27: Feuerwehrraum der Firma Vitra, Weil am Rhein, von Zaha Hadid

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

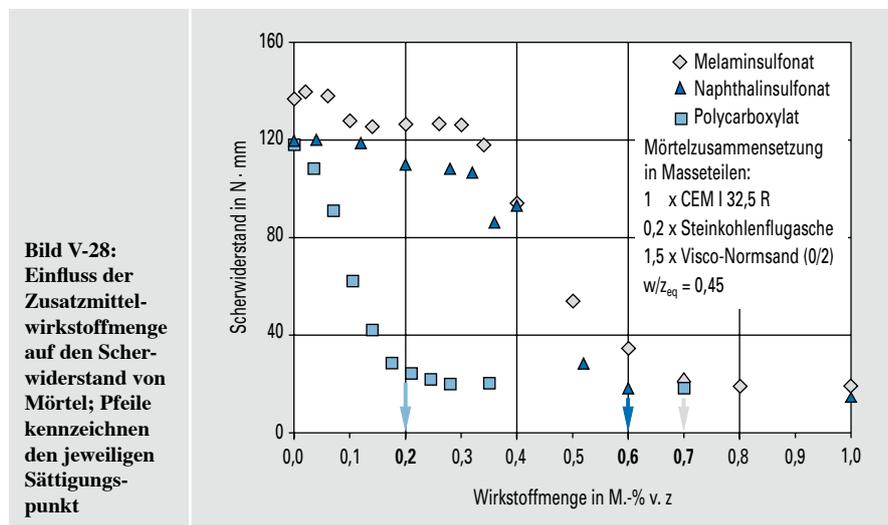
Das Erreichen vorgegebener Betonoberflächenqualitäten ist während des Betoniervorgangs weder überprüf- noch steuerbar. Erst nach dem Entschalen und Trocknen der Betonoberfläche kann die erreichte Qualität des Sichtbetons bewertet werden. Dabei führen immer wieder Farbunterschiede zu Beanstandungen, die 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 Mehlkorbleim 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

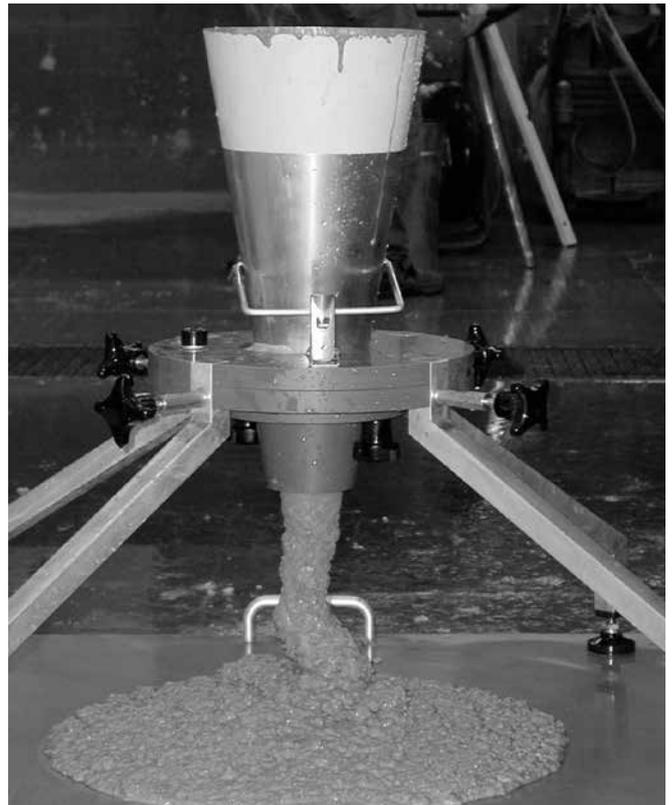


Bild V-30: Ermittlung der Auslaufzeit und des Setzfließmaßes mit dem Auslaufkegel

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 Betonfertigteilerproduktion, 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

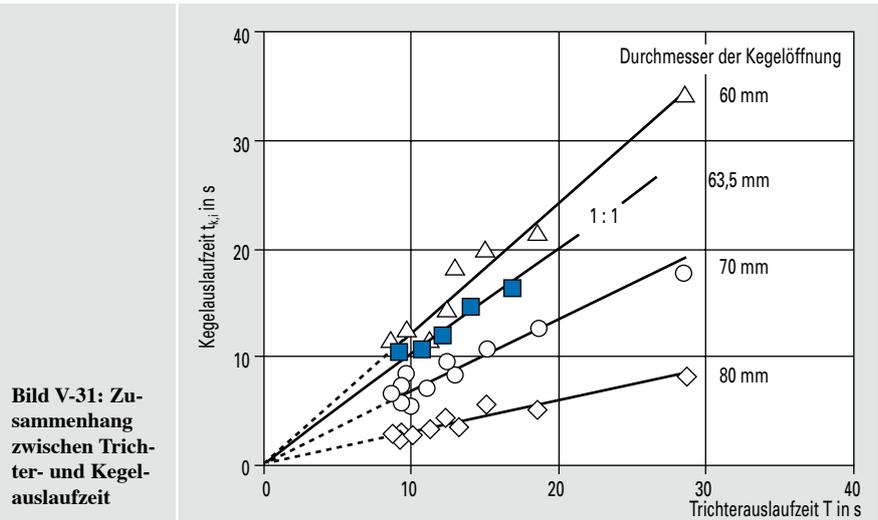
Hersteller von selbstverdichtendem Beton, die Verarbeitbarkeitseigenschaften seines SVB in Frisch- und Festbetonuntersuchungen zu ermitteln und in der Erstprüfung zu belegen. Der Hersteller sichert die Eigenschaft „Selbstverdichtung“ zu und gibt die Zielwerte und zulässigen Abweichungen für das Setzfließmaß 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.



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

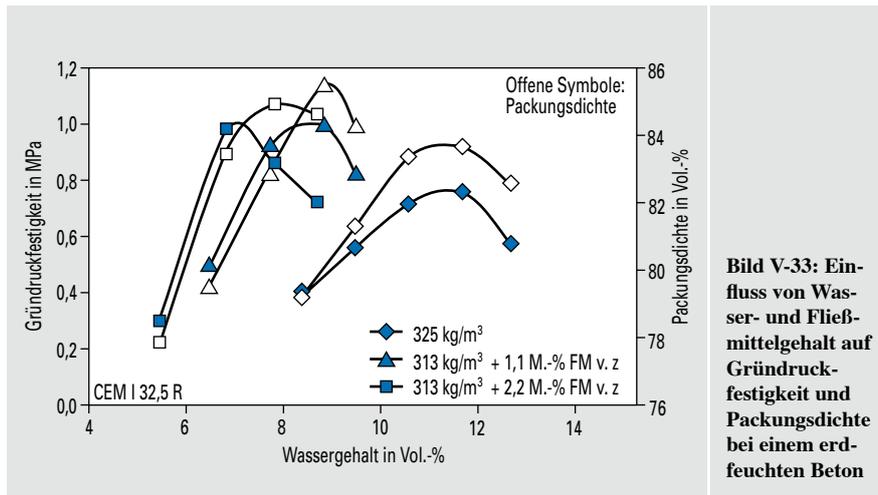


Bild V-33: Einfluss von Wasser- und Fließmittelgehalt auf Gründruckfestigkeit und Packungsdichte bei einem erdfeuchten Beton

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 hütten sandhaltige 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	Hütten sandgehalt in M.-%	Alkaligehalt des Zements Na ₂ O-Äquivalent in M.-%	Alkaligehalt des Zements ohne Hütten sand 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)

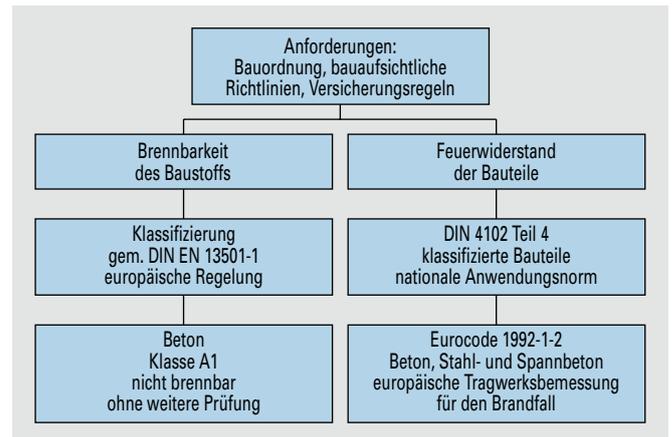


Bild V-36: Schema für die brandschutztechnischen Klassifizierungs- und Bemessungsregeln beim Übergang auf die europäischen Normen; derzeitiger Stand

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 Auswechslens 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 Fertigteileindustrie, 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.

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 praxisgerechter 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 Betonfertigteile (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 Materialausgangsparameter 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

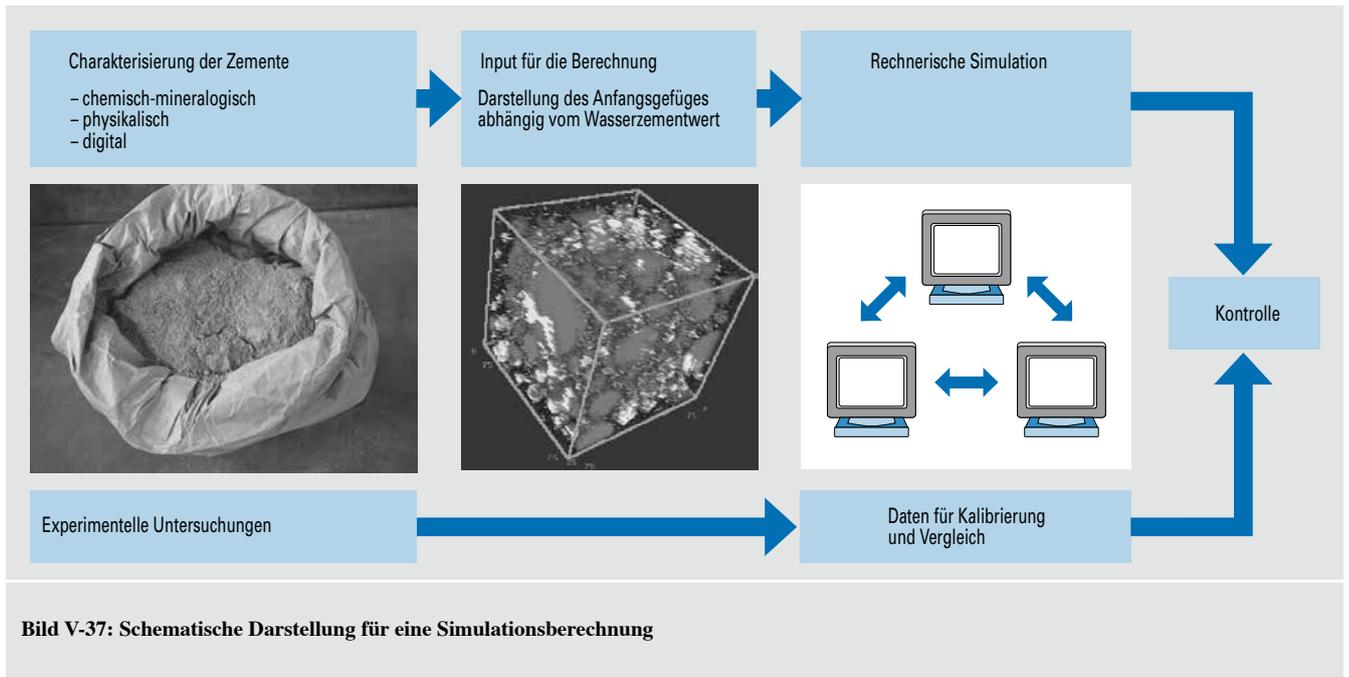


Bild V-37: Schematische Darstellung für eine Simulationsberechnung

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	

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.

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.

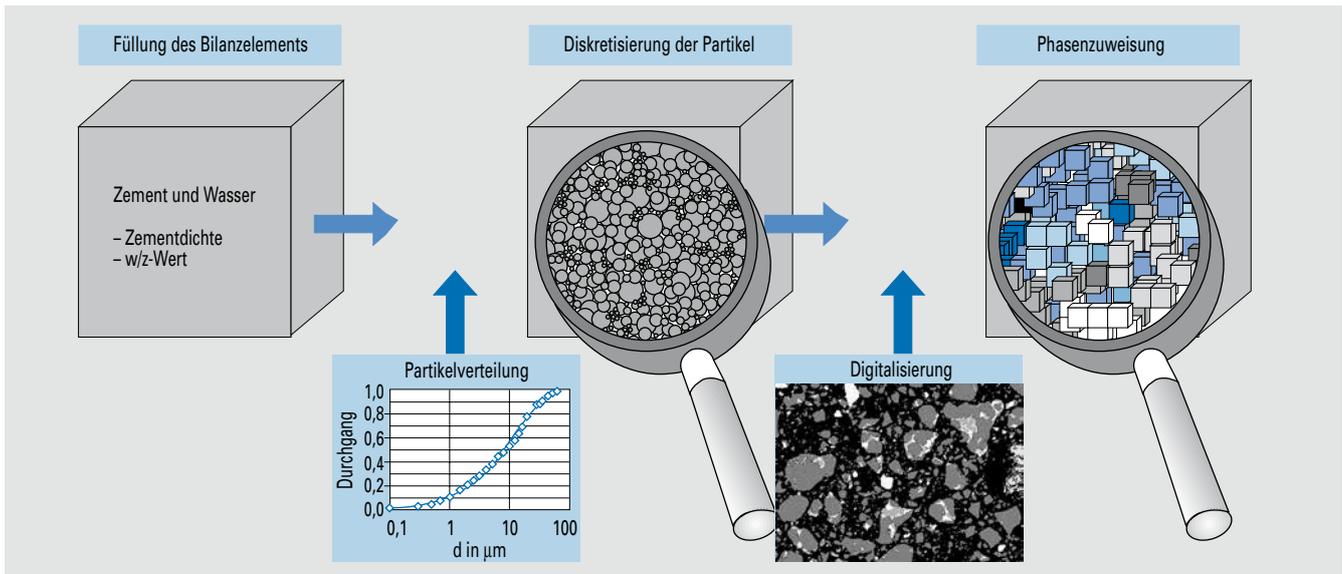


Bild V-38: Füllung des Bilanzelements für die Simulation mit dem NIST-Modell

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 Hydrationsprozess zeigt deutlich die Auflösung der Zementpartikel und die zunehmende Ausbildung eines Mikrogefüges.

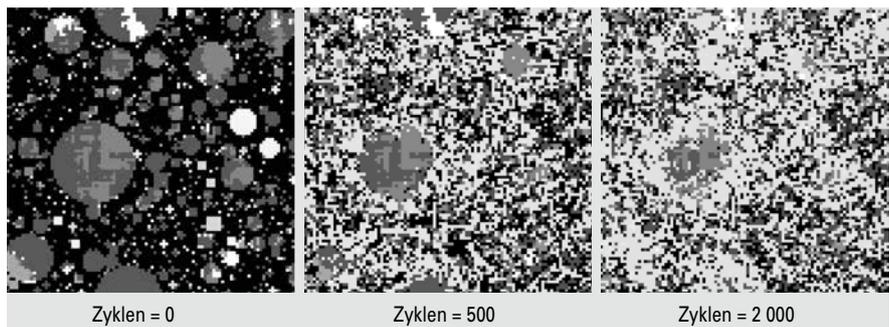


Bild V-39: Gefügeentwicklung im Zementstein infolge des Hydrationsprozesses

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 Hydrationswärme.

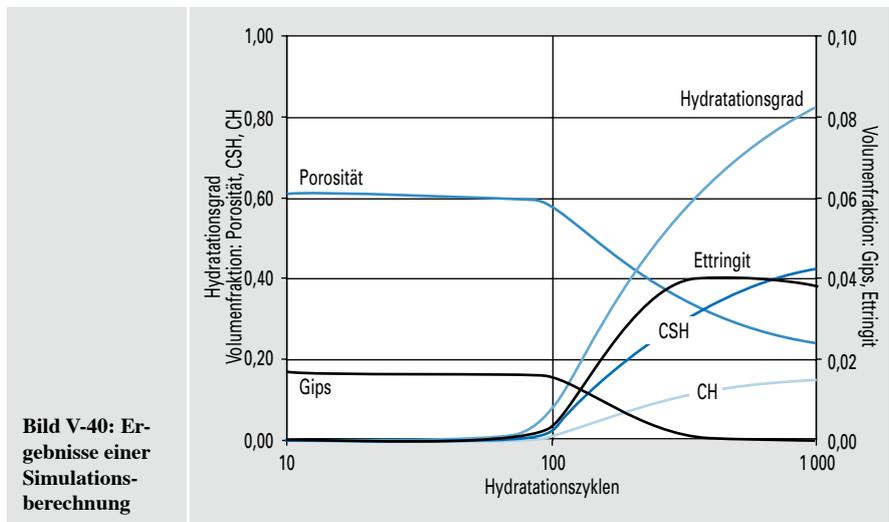


Bild V-40: Ergebnisse einer Simulationsberechnung

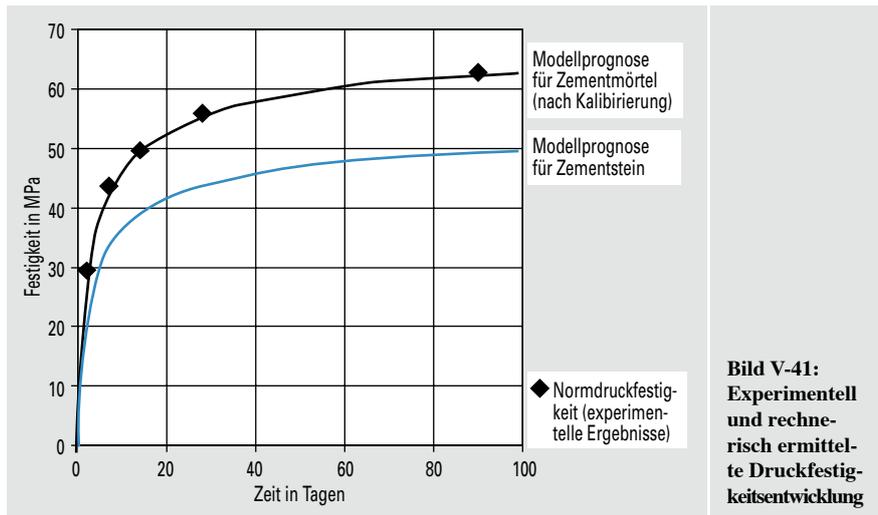


Bild V-41:
Experimentell
und rechnerisch
ermittelte
Druckfestigkeitsentwicklung

Rechnerische Ermittlung der Druckfestigkeit

Maßgebend für die Druckfestigkeit des Zementsteins ist in erster Linie die Kapillarporosität, die im Wesentlichen vom Hydratationsgrad 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 Hydratationsprodukte 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 Hydratationsgrad, 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.

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 ($f/z =$

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.

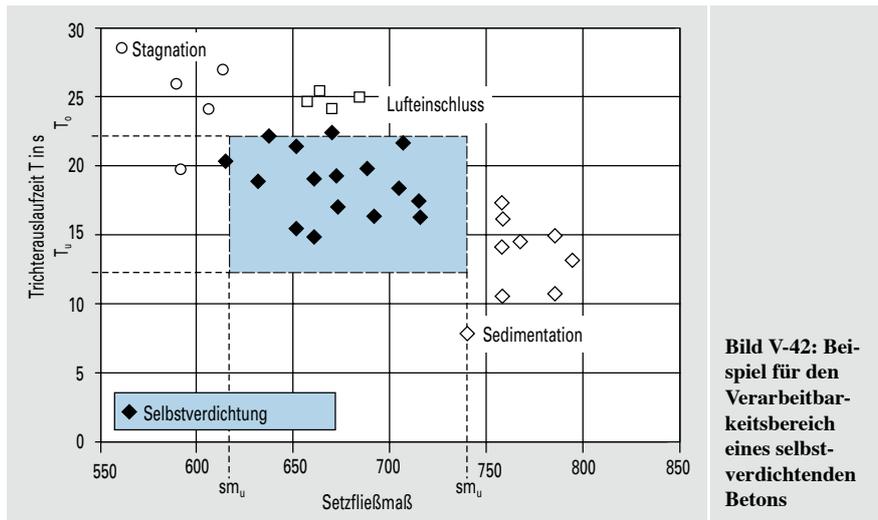


Bild V-42: Beispiel für den Verarbeitbarkeitsbereich eines selbstverdichtenden Betons

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 Expositionsclassen 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 Expositionsclassen XF2, XF3, XF4 und XA2 zugelassen. Die Reduzierung des Zementgehalts in den verschiedenen Expositionsclassen 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 Expositionsclassenklasse 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 Verarbeitbarkeitseigenschaften 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 porierte 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.

VI

Umweltverträglichkeit von Zement und Beton

Durch das in der Öffentlichkeit stark gestiegene Umweltbewusstsein hat die Umweltverträglichkeit von Baustoffen in den letzten Jahren einen immer größeren Stellenwert erlangt. Heute werden Entscheidungen für bestimmte Baustoffe und Bauweisen nicht nur von technischen und wirtschaftlichen, sondern zunehmend auch von ökologischen Gesichtspunkten beeinflusst. Ziel ist es, ein auf die Bedürfnisse des Nutzers zugeschnittenes Bauwerk zu erstellen, das von seiner Errichtung über seine Nutzung bis zu seinem Rückbau insgesamt geringe Umweltwirkungen bei möglichst niedrigen Kosten verursacht. Eine wesentliche Voraussetzung dafür ist die Umweltverträglichkeit der eingesetzten Baustoffe.

Zement und Beton haben sich seit Jahrzehnten für Bauteile in Kontakt mit Boden, Grundwasser und Trinkwasser hervorragend bewährt. Umfangreiche Untersuchungen belegen, dass Spurenelemente oder kritische organische Substanzen nur in äußerst geringen Mengen vorhanden sind, die dem Eintrag aus den Roh- und Prozessstoffen entsprechen. Die Freisetzung solcher Spurenstoffe während der Nutzung der Bauwerke ist aufgrund des großen Bindevermögens des Zementsteins für Spurenelemente und der Einkapselung in das feste und dichte Zementsteingefüge nur sehr gering und liegt häufig an der Nachweisgrenze der modernen, sehr empfindlichen Analysemethoden.

Zuverlässige und dauerhafte Betonbauteile und -werke wie z. B. Abwasseranlagen und Kläranlagen tragen zum Schutz der Umwelt bei. Direkte Umweltentlastungen entstehen durch den Einsatz sekundärer Roh- und Brennstoffe bei der Klinkerherstellung sowie durch die Verwertung geeigneter Reststoffe bei der Zementherstellung. Grundsätzlich kommen dabei nur solche Sekundärstoffe zum Einsatz, die weder die Emissionen noch die Gleichmäßigkeit und die bautechnischen Eigenschaften des Zements sowie dessen Umweltverträglichkeit beeinträchtigen.

Die zunehmende Bedeutung des Umweltrechts für das Bauen spiegelt sich auch in Regelwerken und Normen wider. Neben nationalen Regelungen, die z. B. die hygienischen und umweltrelevanten Anforderungen an zementgebundene Baustoffe im Kontakt mit Boden, Grundwasser und Trinkwasser festlegen, werden zurzeit entsprechende europäische Regelungen ausgearbeitet. Das Forschungsinstitut verfolgt bei der Mitarbeit in diesen Gremien das Ziel, die bestehenden positiven Erfahrungen zur Umweltverträglichkeit zementgebundener Baustoffe in den Regelwerken zu verankern und den Prüfumfang auf das erforderliche Maß zu begrenzen.



Umweltkriterien für zementgebundene Baustoffe ■

Der Klinkerbrennprozess zeichnet sich durch das stark basisch reagierende Brenngut, die hohen Brennguttemperaturen sowie den intensiven Kontakt zwischen den Feststoffen und dem Ofengas – mit Gastemperaturen von bis zu 2000 °C – aus. Damit bieten Drehrohrofenanlagen der Zementindustrie ausgezeichnete Bedingungen für die zuverlässige und umweltverträgliche Verwertung vieler Reststoffe.

Die deutsche Zementindustrie leistet durch die Verwertung geeigneter Reststoffe einen wichtigen Beitrag zur Entlastung der Umwelt. Dadurch werden Primärenergieträger eingespart, der Entsorgungsdruck der Industrie und der Kommunen gemindert sowie natürliche Rohstoffquellen geschont. Grundsätzlich kommen nur solche Stoffe zum Einsatz, die die Emissionen, die Gleichmäßigkeit und die bautechnischen Eigenschaften des Zements sowie dessen Umweltverträglichkeit nicht beeinträchtigen.

Sekundärbrenn- und -rohstoffe

Für die Klinkerherstellung wurden im Jahr 2003 in Deutschland 38 % der Primärbrennstoffe durch Sekundärbrennstoffe ersetzt. Die größte Bedeutung haben dabei aufbereitete Fraktionen aus Industrie- und Gewerbeabfällen, Altreifen, Altöl, Tiermehle und -fette sowie Altholz. Die energetische Verwertung energiehaltiger Reststoffe bei der Klinkerherstellung leistet einen Beitrag zur CO₂-Minderung, ohne dass dabei weitere produktionsspezifische Reststoffe anfallen. Aufgrund der sehr hohen Temperaturen der Drehofenfeuerung werden organische Stoffe praktisch vollständig zu Kohlendioxid und Wasser umgesetzt. Von daher sind insbesondere die Emissionskonzentrationen von Dioxinen und Furanen sehr gering. Dies gilt unabhängig von den eingesetzten Brennstoffen.

Neben Sekundärbrennstoffen können in Abhängigkeit von der Rohstoffsituation eines Zementwerks geeignete sekundäre Nebenprodukte wie Industriekalk, Gießereialtsande, Kiesabbrand, Flugaschen sowie Reststoffe aus der Eisen- und Stahlindustrie als Rohmaterialkomponenten bzw. als Korrekturstoffe für die Rohmischung umweltverträglich eingesetzt werden.

Spurenelementgehalte im Zement

Zement enthält wie alle aus natürlichen Rohstoffen stammenden Baustoffe geringe Mengen an Spurenelementen, die mit den Roh- und Brennstoffen in den Herstellungsprozess gelangen. Je nach Flüchtigkeit und Prozessbedingungen verbleiben diese mehr oder weniger vollständig im Klinker. Ein wichtiges Beurteilungskriterium für die umweltverträgliche Verwertung von sekundären Roh- und Brennstoffen ist deshalb deren Spurenelementgehalt. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass diese Sekundärstoffe lediglich einen entsprechenden Anteil ebenfalls spurenelementhaltiger, primärer Einsatzstoffe ersetzen.

Alle bislang durchgeführten Untersuchungen belegen, dass der heute übliche Einsatz von Sekundärstoffen in der deutschen Zementindustrie zu keiner wesentlichen Änderung der Spurenelementgehalte im Produkt führt. Insgesamt gesehen liegen die Spurenelementgehalte deutscher Zemente in der gleichen Größenordnung wie die Gehalte in natürlichen Gesteinen, Böden und Tonen, unabhängig davon, ob bei der Zementproduktion Sekundärstoffe eingesetzt werden oder nicht.

Alle bislang durchgeführten Untersuchungen belegen, dass der heute übliche Einsatz von Sekundärstoffen in der deutschen Zementindustrie zu keiner wesentlichen Änderung der Spurenelementgehalte im Produkt führt. Insgesamt gesehen liegen die Spurenelementgehalte deutscher Zemente in der gleichen Größenordnung wie die Gehalte in natürlichen Gesteinen, Böden und Tonen, unabhängig davon, ob bei der Zementproduktion Sekundärstoffe eingesetzt werden oder nicht.

Spurenelementfreisetzung

Wie der Zement enthalten auch Gesteinskörnungen und Betonzusatzstoffe geringe Mengen an Spurenelementen. Für die Beurteilung der Umweltverträglichkeit eines Baustoffs ist jedoch nicht dessen Gehalt an Spurenelementen entscheidend, sondern nur der Anteil, der während der Herstellung und Nutzung auf die Umweltmedien Wasser, Boden oder Luft übergehen kann. Entscheidend für eine Freisetzung ist der im Porenwasser gelöste Spurenelementanteil. Zahlreiche Untersuchungen belegen, dass die meisten Spurenelemente wie zum Beispiel Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Vanadium, Zink usw. in Frischmörteln oder -betonen in fast vollständig unlöslicher Form vorliegen und nur in äußerst geringen Mengen freigesetzt werden. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Spurenelementen können die in Zementen enthaltenen Alkali- und Chromverbindungen eine höhere Löslichkeit im Porenwasser aufweisen. Deshalb war zu prüfen, welche Mengen dieser Substanzen aus Mörteln und Betonen freigesetzt werden können. Intensive Forschungsarbeiten am Institut für Bauforschung (ibac) haben Untersuchungen des Forschungsinstituts zur Abgabe von Alkali- und Chromverbindungen aus Frischbeton bestätigt. Demnach ist Chrom das einzige untersuchte Spurenelement, das aus Frischbeton in möglicherweise umweltrelevanten Konzentrationen freigesetzt werden kann. Die Untersuchungen haben jedoch auch ergeben, dass erhöhte Chromgehalte nur in der unmittelbaren Kontaktzone und nur für kurze Zeit auftreten. Für alle Substanzen

gilt, dass die Freisetzung mit fortschreitender Hydratation durch die Ausbildung der dichten, festen Zementsteinmatrix sehr stark vermindert wird. Beim Chrom kommt hinzu, dass der gelöste Anteil chemisch in den Chromatettringit eingebunden wird und damit zeitverzögert in eine praktisch wasserunlösliche Verbindung übergeht.

Insgesamt zeigen alle Untersuchungen, dass beim Betonieren in der gesättigten Bodenzone erhöhte Stoffkonzentrationen im Grundwasser nur in geringen Abständen zum Bauteil und nur für kurze Zeiträume auftreten können. Wegen der sehr geringen Frachten bewirken sie keine dauernde oder erhebliche schädliche Veränderung des Grundwassers und sind somit aus Sicht des Umweltschutzes nicht relevant.

Um das grundsätzliche Verständnis zur Freisetzung von Spurenelementen aus zementgebundenen Baustoffen zu vertiefen und Kriterien zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Mörteln und Betonen abzuleiten, wurde von einem europäischen Konsortium bereits vor mehreren Jahren das Forschungsvorhaben „Environmental Criteria For Cement Based Products (EC-RICEM)“ begonnen. Forschungspartner sind das Energy Research Centre for the Netherlands (ECN), die Holcim Group Support Ltd. Ciments d'Obourg, Norcem A.S. sowie der Verein Deutscher Zementwerke. Schwerpunkt dieser Forschungsarbeiten war zunächst die Charakterisierung des Auslaugverhaltens zementgebundener Baustoffe, die mit weltweit bezogenen Portlandzementen mit möglichst hohen Spurenelementgehalten hergestellt wurden. Darüber hinaus kamen zwei Technikumszemente mit künstlich erhöhtem Spurenelementanteil zum Einsatz. Dabei wurden diejenigen Auslaugverfahren eingesetzt, die derzeit in Europa am häufigsten angewendet werden. Bei allen Untersuchungen zeigte sich, dass die Abgabe von Spurenelementen aus zementgebundenen Baustoffen unter üblichen Anwendungsbedingungen keine negativen Auswirkungen auf die Umwelt hat, selbst wenn der Spurenelementanteil im Zement durch gezielte Dotierung deutlich erhöht wird.

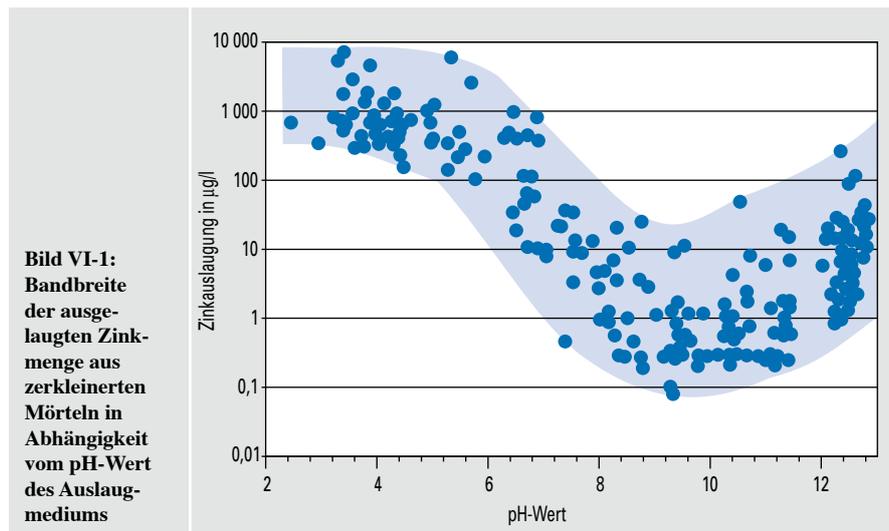
Der erste Teil des ECRICEM-Projekts, der sich im Wesentlichen auf Versuche mit Portlandzementen konzentriert hatte, wurde Ende des Jahres 2001 abgeschlossen. Im Berichtszeitraum wurden in einer zweiten Phase (ECRICEM II) intensive Untersuchungen zu Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen durchgeführt. Die Ergebnisse der durchgeführten Auslaugversuche haben das günstige Umweltverhalten zementge-

bundener Werkstoffe bestätigt. Sie haben auch gezeigt, dass Mörtel mit Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen generell eine gleiche Freisetzungsscharakteristik für Spurenelemente aufweisen wie solche mit Portlandzementen.

Bild VI-1 zeigt zum Beispiel die Bandbreite der ausgelaugten Zinkmenge aus zerkleinerten Mörteln in Abhängigkeit vom pH-Wert des Auslaugmediums. Für diese Untersuchungen kamen Mörtel (Korngröße < 2 mm) zum Einsatz, die mit mehr als 40 verschiedenen Zementen (CEM I bis CEM V) hergestellt wurden. Aus dem Bild geht hervor, dass trotz der erheblichen Bandbreite der Einzelwerte eine vergleichbare pH-Wert-Abhängigkeit der Zinkauslaugung gegeben ist. Bei der Bewertung der freigesetzten Zinkmengen muss berücksichtigt werden, dass diese Auslaugversuche an zerkleinerten Mörteln und über einen großen pH-Wert-Bereich durchgeführt wurden. Unter üblichen Anwendungsbedingungen wird das Auslaugverhalten zementgebundener Baustoffe durch die natürliche Alkalität und die Dichteit des Zementsteins bestimmt. Von daher hat die Zinkabgabe keine Umweltrelevanz. Eine Ausnahme hinsichtlich der generellen Freisetzungsscharakteristik ergab sich für das Element Chrom. Hier zeigte sich, dass Mörtel, die mit hüttensandhaltigen Zementen hergestellt wurden, nur sehr geringe Mengen an Chrom auslaugten, die deutlich unter den Werten selbst von chromatreduzierten Portlandzementen lagen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die in Hüttensanden enthaltenen reduzierenden Bestandteile für die geringe Freisetzung verantwortlich sind.

Neben den Auslauguntersuchungen wurde im Berichtszeitraum intensiv an der Modellierung chemischer Reaktionen in zementgebundenen Baustoffen gearbeitet. Das Verständnis solcher Reaktionen, die die Löslichkeit der entsprechenden Substanzen im Porenwasser und damit auch die diffusionskontrollierte Auslaugung bestimmen, bildet die Basis für die Beschreibung des Langzeitverhaltens zementgebundener Werkstoffe in Kontakt mit Trinkwasser, Grundwasser und Boden. Diese Modellierungen können ebenfalls dazu dienen, Kriterien für den umweltverträglichen Einsatz von Sekundärstoffen in der Zementindustrie besser zu beschreiben.

Weiterhin wurde an möglichen Freisetzungsszenarien sowie an der Modellierung der Auslaugung und Ausbreitung von Substanzen im Boden und Grundwasser gearbeitet. Eine sachgerechte Beurteilung



von Laborergebnissen kann nur auf der Basis einer vorgegebenen Boden- oder Grundwasserqualität in einem bestimmten Abstand zum Bauwerk in Verbindung mit geeigneten, standardisierten Freisetzungsszenarien erfolgen. Die Ergebnisse des ECRICEM-Projekts werden in die anstehenden europäischen Normungsarbeiten einfließen. Sie können dazu beitragen, die Diskussionen zur Verankerung der wesentlichen Anforderungen an Hygiene, Gesundheit und Umwelt in den harmonisierten europäischen Produktnormen auf eine wissenschaftlich abgesicherte Basis zu stellen.

Europäische Bauproduktenrichtlinie ■

Im Jahr 1989 wurde die Europäische Bauproduktenrichtlinie verabschiedet. Sie fordert, dass die auf dem europäischen Binnenmarkt gehandelten Bauprodukte so beschaffen sind, dass die daraus hergestellten Bauwerke allen wesentlichen Anforderungen z.B. an Standfestigkeit, Feuersicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit entsprechen. Neben diesen traditionell im Baurecht verankerten Anforderungen nimmt die europäische Bauproduktenrichtlinie gezielt Bezug auf den Schutz von Hygiene, Gesundheit und Umwelt.

Von Normen, die im Sinne der Europäischen Bauproduktenrichtlinie harmonisiert sind, wird gefordert, dass sie die für den Schutz der unmittelbaren Umgebung eines Bauwerks notwendigen Festlegungen enthalten. Die Ausarbeitung solcher Festlegungen setzt allerdings voraus, dass qualitative und wenn notwendig auch quantitative Anforderungen in den entsprechenden Bauordnungen der Mitgliedsstaaten

vorhanden sind. Eine Analyse der bestehenden Anforderungen in den Mitgliedsstaaten der EU hat ergeben, dass zurzeit offensichtlich nur zwei Mitgliedsstaaten, die Niederlande und Deutschland, quantitative Anforderungen an Bauprodukte stellen. Diese sind darauf gerichtet, die Freisetzung gefährlicher Substanzen an die Umweltmedien Wasser, Boden und Luft aus Bauprodukten während der Nutzung von Bauwerken zu begrenzen.

Dieser geringe Bestand entsprechender nationaler Regelungen hat dazu geführt, dass die bisher verabschiedeten harmonisierten Produktnormen, darunter die europäische Zementnorm EN 197-1, ausschließlich allgemeine Hinweise auf bestehende nationale Anforderungen enthalten. Für die zukünftige Aus- und Überarbeitung harmonisierter technischer Spezifikationen sollen nun ein Nachweiskonzept und zugehörige Nachweisinstrumente, wie z.B. Prüfverfahren und Analysemethoden, erarbeitet werden. Dazu hat die EU-Kommission ein Mandat entworfen, das den Titel trägt: „Development of horizontal standardized assessment methods for harmonized approaches relating to dangerous substances under the construction products directive“. Ende des Jahres 2004 hat der „Ständige Ausschuss für das Bauwesen (SCC)“ dem Mandat zugestimmt.

Nachweiskonzept

Unter Einbindung der interessierten Kreise konnte bei der EU ein mehrstufiges Nachweiskonzept durchgesetzt werden. Vertreter des Forschungsinstituts haben sich als Repräsentanten der europäischen Baustoffindustrie aktiv in die entsprechenden Beratungen eingebracht. Das mehrstufige Konzept soll sicherstellen, dass nur dort Nachweise gefordert werden, wo dies unter Beurteilung möglicher Gefährdungen der

Umweltmedien Wasser, Boden und Luft durch das jeweilige Bauprodukt tatsächlich notwendig ist. Im Einzelnen sind folgende drei Nachweismöglichkeiten vorgesehen:

- Nachweis ohne Prüfung (Without Testing), so genannte „WT-Produkte“
- Nachweis ohne regelmäßige Prüfung (Without Further Testing), so genannte „WFT-Produkte“
- Nachweis durch regelmäßige Prüfung (With Further Testing), so genannte „FT-Produkte“.

Bei der Beurteilung einer möglichen Umweltgefährdung durch Bauprodukte wird die Freisetzung gefährlicher Substanzen in die Innenraumluft von Bauwerken (Ausgasung) sowie die Freisetzung gefährlicher Substanzen in Boden und Grundwasser (Auslaugung) betrachtet. Für rein anorganische, zementgebundene Baustoffe sollte die Ausgasung gefährlicher Substanzen keine Bedeutung haben.

Nachweisinstrumente

Zur Zuordnung der Bauprodukte zu den oben genannten Nachweismöglichkeiten sollen die nötigen Instrumente europaweit vereinheitlicht werden, indem entsprechende europäische Normen erarbeitet werden. Bevor diese angewendet werden, muss sichergestellt sein, dass für die jeweiligen Bauprodukte die praktische Erfahrung aus der Anwendung angemessen berücksichtigt wird. Dies ist besonders wichtig, wenn die Beurteilung ohne Prüfung erfolgt (WT-Produkt).

Sind Prüfungen erforderlich, um ein Bauprodukt als WFT-Produkt einzustufen, sind dafür Charakterisierungsprüfungen vorgesehen. Mit diesen Prüfungen sollen sowohl der Gehalt als auch die Freisetzung gefährlicher Substanzen beurteilt werden. Bei Produkten, die bei Konformitätsnachweisen zu prüfen sind, spricht man auch hier von Erst- und Regelprüfungen. Hierzu sind genormte Prüfverfahren zu erarbeiten, die weitestgehend horizontal, d.h. in ihren Grundzügen produktunabhängig sein sollen.

Nach den Vorstellungen der EU-Kommission soll die Entscheidung über die für ein Bauprodukt erforderlichen Nachweise durch die Mitgliedsstaaten, vertreten durch den „Ständigen Ausschuss für das Bauwesen“, getroffen werden. Dies gilt insbesondere für die Freistellung von Prüfungen für WT-Produkte. Zur Vorbereitung dieser Entscheidungen wird durch die EU-Kommission die Expertengruppe „Dangerous Substances“ eingerichtet. Die

Expertengruppe soll sich nach Möglichkeit nur auf Arbeitsvorlagen stützen, die von den europäischen Normungs- bzw. Zulassungsinstitutionen CEN bzw. EOTA, d.h. von den zuständigen Produktkomitees, erstellt werden. Vertreter des FIZ arbeiten in den maßgeblichen Produktkomitees mit und werden ihre Standpunkte über die „Vereinigung Europäischer Baustoffhersteller (CEPMC)“ in die zuständige Expertengruppe einbringen.

Auswirkungen auf zementgebundene Baustoffe

Zementgebundene Baustoffe haben sich seit Jahrzehnten für Bauteile im Kontakt mit Boden und Grundwasser bewährt. Umfangreiche Laboruntersuchungen belegen, dass Spurenelemente oder kritische organische Verbindungen nur in Spuren vorhanden sind, die dem Eintrag aus den Roh- und Prozessstoffen entsprechen. Die Freisetzung solcher Spurenstoffe unter den Nutzungszuständen der Bauwerke ist sehr gering und liegt häufig an der analytischen Nachweisgrenze. Diese Aussage ist durch umfangreiche Untersuchungen auch für Zemente belegt, bei denen sekundäre Roh- und Brennstoffe zum Einsatz kommen (s. Abschnitt: Umweltkriterien für zementgebundene Baustoffe).

Aus Sicht der Zementindustrie sind die vorliegenden Untersuchungsergebnisse die Basis dafür, dass Zemente nach EN 197-1 ohne Prüfung zur Herstellung von Bauprodukten und Bauteilen im Kontakt mit Boden und Grundwasser eingesetzt werden können (WT-Produkt). Konkret wird diese Einstufung in Mitgliedsstaaten zu vertreten sein, in denen Anforderungen an Bauprodukte hinsichtlich des Boden- und Grundwasserschutzes bestehen. Dieses gilt derzeit für die Niederlande und für Deutschland.

DIBt-Merkblatt „Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ ■

Für Bauprodukte, die eine bauaufsichtliche Zulassung benötigen, müssen bei den entsprechenden Zulassungsprüfungen auch mögliche Boden- und Grundwassergefährdungen berücksichtigt werden. Das Merkblatt „Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) fasst dazu die naturwissenschaftlichen, technischen und rechtlichen Grundlagen zusammen. Dieses allgemeine Bewertungskonzept, das für alle

Bauprodukte in Kontakt mit Boden und Grundwasser gilt, wurde in der Fassung November 2000 veröffentlicht und wird zurzeit überarbeitet.

Um die stoffspezifischen Eigenschaften der verschiedenen Baustoffe sachgerecht zu berücksichtigen, werden die allgemeinen Bewertungsgrundsätze in einem Teil II für unterschiedliche Bauprodukte konkretisiert. Dazu wurden vom DIBt die Projektgruppen

- Beton und zementgebundene Baustoffe,
- Bodeninjektionsmittel und
- Kanalrohrsaniierungsmittel

eingerrichtet. Die Projektgruppe „Beton und zementgebundene Baustoffe“ hat im Berichtszeitraum das Bewertungskonzept für „Beton und Betonausgangsstoffe“ fertig gestellt. Obwohl es noch nicht veröffentlicht ist, wendet das DIBt dieses Bewertungskonzept bereits bei den Zulassungsprüfungen an.

Das Bewertungskonzept gilt für Zemente, Betonzusatzstoffe, Betonzusatzmittel und Gesteinskörnungen sowie für Konstruktionsmörtel und Betone, die eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung benötigen. Die Sachverständigen des DIBt legen die durchzuführenden Untersuchungen fest. Sie beziehen sich dabei auf Informationen zum Bauprodukt, die der Antragsteller bereitstellt. Um die Stofffreisetzung zu ermitteln stehen unterschiedliche Auslaugungsverfahren zur Verfügung.

Für den seltenen Fall der wasserdurchlässigen Betonbauweisen legt der entsprechende Sachverständigenausschuss die Prüfverfahren im Einzelfall fest. Wasserundurchlässige Bauweisen über dem Grundwasserspiegel werden im Allgemeinen als unkritisch angesehen; deshalb sind hierfür nur in Sonderfällen Auslaugprüfungen notwendig. Diese sind entsprechend dem Trogverfahren durchzuführen, das von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) entwickelt wurde. Dabei müssen die Inhaltsstoffe in den Eluaten direkt die im DIBt-Merkblatt aufgeführten Geringfügigkeitsschwellenwerte bzw. die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung oder vergleichbare Werte einhalten.

Wasserundurchlässige Bauweisen im Grundwasser werden beurteilt, indem das Kontaktgrundwasser zur Abschätzung der Stofffreisetzung aus realen Bauteilen herangezogen wird. In Modellrechnungen werden die Auslaugung aus dem Bau-

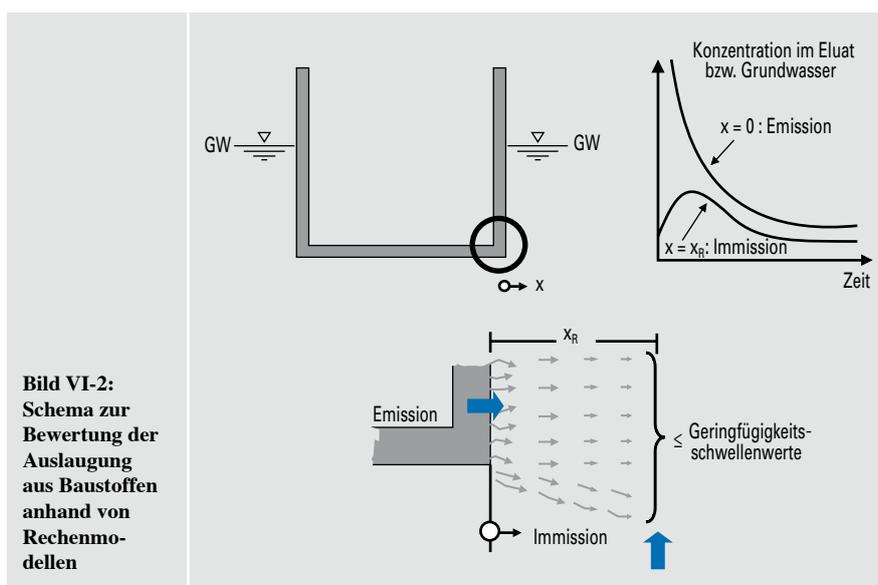
stoff mit einem Diffusionsmodell und die Stoffausbreitung im Boden / Grundwasser durch ein geologisches Strömungs- und Transportmodell ermittelt. Durch die Kombination der beiden Modelle kann der zeitliche Verlauf der Stoffkonzentrationen im Grundwasser für definierte Randbedingungen prognostiziert werden (Bild VI-2).

Zur Berechnung der Freisetzung mit dem Diffusionsmodell sind die Ergebnisse von Langzeitstandtests geeignet. Ein Arbeitskreis des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) hat unter Mitwirkung des Forschungsinstituts einen entsprechenden Test für Festbeton zur Normung vorbereitet. Er sieht Auslaugprüfungen an $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ Betonwürfeln und die Entnahme von sechs Eluatn vor, die nach unterschiedlichen Versuchsdauern erhalten werden. Die Gesamtversuchszeit beträgt 56 Tage.

Als Randbedingungen für die Modellrechnung sieht der Teil II des DIBt-Merkblatts „Beton und Betonausgangsstoffe“ eine Bauteilfläche von 400 m^2 , einen Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens von 10^{-4} m/s und eine effektive Porosität von 0,1 sowie ein Grundwassergefälle von 10^{-3} vor. Die Schichtdicke des Kontaktgrundwassers (X_R) für die kleinräumige Mittelwertbildung beträgt 0 bis 0,3 m. Als Zeitspanne, über die zeitlich gemittelt wird, sind 6 Monate festgelegt. Als Bodentemperatur werden 10 °C angenommen. Bei der Berechnung darf keine Retardierung und kein chemischer oder biologischer Abbau berücksichtigt werden. Die Randbedingungen sind bewusst scharf gewählt, damit möglichst vielfältige Einsatzbereiche durch den konventionellen Nachweis erfasst werden.

Auf der Grundlage dieser festgelegten Modellparameter können mit dem Freisetzungmodell unter Bezug auf die festgelegten jeweiligen Geringfügigkeitsschwellenwerte der verschiedenen Substanzen die im 56-Tage-Standtest einzuhaltenden maximal zulässigen Freisetzungsmengen berechnet werden. In Tafel VI-1 sind die derzeit zu untersuchenden Spurenelemente für zementgebundene Baustoffe und die zulässigen Freisetzungsmengen zusammengefasst.

Ein Unterausschuss der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) befasste sich schon seit längerer Zeit mit der Überarbeitung der bestehenden Geringfügigkeitsschwellenwerte und der Ableitung neuer Werte für weitere Parameter. Hierzu



Tafel VI-1: Maximal zulässige Freisetzung aus zementgebundenen Baustoffen im Langzeitstandtest nach 56 Tagen entsprechend DIBt-Merkblatt Teil II

Element	Maximal zulässige Freisetzung im Langzeitstandtest nach 56 Tagen in mg/m^2
Arsen (As)	5
Blei (Pb)	12
Cadmium (Cd)	2,4
Chrom (Cr ges.)	24
Chrom (Cr(VI))	4
Kobalt (Co)	24
Kupfer (Cu)	24
Nickel (Ni)	24
Zink (Zn)	150

gehören zum Beispiel Barium und Vanadium. Die überarbeiteten und ergänzten Geringfügigkeitsschwellenwerte sind Ende des Jahres 2004 von der Umweltministerkonferenz (UMK) zur Veröffentlichung freigegeben worden. Es ist davon auszugehen, dass das DIBt die neuen Werte und Parameter in das Merkblatt aufnehmen wird. Welche neuen Parameter für den speziellen Teil II „Beton und Betonausgangsstoffe“ relevant sind, muss noch diskutiert werden. In Tafel VI-2 sind die neuen Geringfügigkeitsschwellenwerte der LAWA den zurzeit gültigen DIBt-Werten gegenübergestellt. Aus der Tafel geht hervor, dass die Werte zum Teil drastisch abgesenkt wurden. Dies gilt zum Beispiel für Cadmium und Zink. Auch der neue Wert für Vanadium ist sehr niedrig angesetzt. Allerdings ist die

Anwendung des Geringfügigkeitsschwellenwerts für Vanadium bis zum 31.12.2007 ausgesetzt, um der Industrie Gelegenheit zu geben, die unvollständige Datenbasis zur Human- und Ökotoxizität zu ergänzen und den Nachweis zu führen, dass ein höherer Wert wissenschaftlich gerechtfertigt ist.

Die neuen Geringfügigkeitsschwellenwerte und Parameter und die damit verbundenen erheblichen Herabsetzungen der zulässigen Freisetzungsraten werden von der betroffenen Baupraxis nachdrücklich in Frage gestellt. Darüber hinaus erscheint es ungewöhnlich und verwunderlich, dass die Industrie die erforderlichen Nachweise für eine sachgerechte Einstufung erbringen soll.

Tafel VI-2: Gegenüberstellung der zurzeit gültigen DIBt-Werte und der neuen Geringfügigkeitsschwellenwerte der LAWA für anorganische Parameter zur Beurteilung von lokal begrenzten Grundwasserverunreinigungen

Anorganische Parameter	Geringfügigkeitsschwellenwert in $\mu\text{g/l}$	
	DIBt-Merkblatt	LAWA-Wert
Antimon (Sb)	10	5
Arsen (As)	10	10
Barium (Ba)	-	340
Blei (Pb)	25	7
Bor (B)	-	740
Cadmium (Cd)	5	0,5
Chrom, gesamt (Cr)	50	-
Chromat (Cr)	8	7
Kobalt (Co)	50	8
Kupfer (Cu)	50	14
Molybdän (Mo)	50	35
Nickel (Ni)	50	14
Quecksilber (Hg)	1	0,2
Selen (Se)	10	7
Thallium (Tl)	-	0,8
Vanadium (V)	-	4*
Zink (Zn)	500	58
Zinn (Sn)	40	-
Chlorid (Cl)	-	250000
Cyanid, gesamt (CN ⁻)	50	50
Cyanid, leicht freisetzbar (CN ⁻)	10	5
Fluorid (F)	750	750
Sulfat (SO ₄ ²⁻)	-	240000

* Die Anwendung des Geringfügigkeitsschwellenwertes für Vanadium ist bis zum 31.12.2007 ausgesetzt.

Tafel VI-3: Vergleich der Höchstwerte der Spurenelementgehalte der zur Betonherstellung eingesetzten Zemente mit den Mittelwerten deutscher Normzemente (VDZ: Spurenelemente in deutschen Normzementen 2001)

Element	Höchstwert der eingesetzten Zemente in mg/kg	Mittelwert deutscher Zemente in mg/kg
Antimon (Sb)	23,1	2,9
Arsen (As)	37,5	7,0
Barium (Ba)	14990	Keine Angabe
Blei (Pb)	34,4	17
Cadmium (Cd)	1,0	0,4
Chrom (Cr)	118	41
Kobalt (Co)	13,1	8,7
Kupfer (Cu)	108	31
Mangan (Mn)	4503	759
Molybdän (Mo)	14,2	Keine Angabe
Nickel (Ni)	44,3	23
Quecksilber (Hg)	0,08	0,06
Thallium (Tl)	1,8	0,4
Vanadium (V)	190	50
Zink (Zn)	303	192
Zinn (Sn)	5,4	3,6

Um die Erfahrungen mit dem DIBt-Bewertungskonzept für zementgebundene Baustoffe zu vertiefen, wurden im Berichtszeitraum im Forschungsinstitut 13 Betone entsprechend dem Konzept hergestellt und im Langzeitstandtest ausgelagert. Um eine möglichst große Bandbreite der Spurenelementgehalte der in Deutschland

hergestellten Normzemente zu erfassen, wurden für die Betonherstellung gezielt Zemente eingesetzt, die für ein oder mehrere Spurenelemente möglichst hohe Stoffgehalte aufwiesen. In **Tafel VI-3** sind die Höchstwerte der 13 untersuchten Zemente den Mittelwerten deutscher Normzemente (VDZ: Spurenelemente in deutschen Normzementen 2001) gegenübergestellt.

Die Ergebnisse der Langzeitstandtests zeigen, dass die Mehrzahl der Eluatwerte für die verschiedenen Spurenelemente unterhalb der Bestimmungsgrenze der eingesetzten, sehr empfindlichen Nachweismethoden liegen. Für die Elemente Arsen, Blei, Cadmium, Thallium und Zinn haben die Tests zu keinen messbaren Werten geführt. Alle untersuchten Elemente unterschreiten die derzeit gültigen DIBt-Werte (**Tafel VI-1**). Etwas anders sieht es bei der Betrachtung der neuen Geringfügigkeitsschwellenwerte und Parameter der LAWA aus. Werden die zulässigen Freisetzungsraten im Langzeitstandtest mit dem bestehenden Modell und den derzeit festgelegten Randbedingungen berechnet, so zeigt sich, dass bei der Auslaugung von Barium, Chromat, Nickel und Vanadium in einigen Fällen Überschreitungen möglich sind.

Für die Baupraxis ist die starke Absenkung der Geringfügigkeitsschwellenwerte nicht akzeptabel. Aus Sicht der Industrie hat die LAWA nicht den erforderlichen Nachweis erbracht, dass eine derart weitgehende Vorsorge notwendig ist. Die LAWA ist jedoch nicht bereit, von diesen Werten – mit Ausnahme des Wertes für Vanadium – abzugehen. Allerdings hat sie angedeutet, dass ggf. eine Anpassung der Randbedingungen bei der Modellrechnung erfolgen kann. So könnte zum Beispiel eine Erhöhung der Schichtdicke (X_R) für die kleinräumige Mittelwertbildung von derzeit 0 bis 0,3 m auf 0 bis 1,0 m oder 2,0 m (d.h. immer noch die unmittelbare Umgebung eines Bauwerks) die Auswirkungen der verschärften Anforderungen etwas mindern. Es bleibt zu hoffen, dass bei den anstehenden Diskussionen eine für beide Seiten zufrieden stellende Lösung gefunden wird.

DVGW-Arbeitsblatt W 347 ■

Aufgrund der großen Bedeutung einer einwandfreien Trinkwasserversorgung werden an alle Werkstoffe, die bei der Trinkwassergewinnung, -speicherung oder beim Transport vom Erzeuger bis zur Entnahmestelle des Verbrauchers in direkten Kontakt mit dem Trinkwasser kommen, strenge hygienische Anforderungen gestellt. Zementgebundene Werkstoffe haben sich seit Jahrzehnten in allen Bereichen der Trinkwasserversorgung bewährt. Mit dem Arbeitsblatt W 347 „Hygienische Anforderungen an zementgebundene Werkstoffe im Trinkwasserbereich – Prüfung und Bewertung“ (Ausgabe Oktober 1999) der Deutschen Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) entstand erstmalig ein Regelwerk, das die spezifischen Eigen-

schaften zementgebundener Werkstoffe in Kontakt mit Trinkwasser sachgerecht berücksichtigt. Das Arbeitsblatt wird zurzeit auf Veranlassung des DVGW überarbeitet. Hintergrund dafür sind die Einführung der europäischen Normen für Zement, Gesteinskörnungen, Betonzusatzmittel usw. sowie die Arbeiten der AHG 6 „Einfluss zementgebundener Produkte auf Wasser für den menschlichen Gebrauch“ des CEN/TC 164 „Trinkwasserversorgung“.

Im aktuellen Entwurf des Arbeitsblatts wurden die Vorbehandlung der Prüfkörper und die Zusammensetzung des Prüfwassers an den Entwurf der europäischen Prüfnorm „Einfluss fabrikmäßig hergestellter zementgebundener Produkte auf organoleptische Parameter“ angepasst. Nach den bislang vorliegenden Untersuchungsergebnissen wird dies jedoch kaum einen Einfluss auf die trinkwasserhygienische Beurteilung zementgebundener Werkstoffe haben. Aufgrund der günstigen Erfahrungen mit dem bestehenden Arbeitsblatt konnte in dem neuen Entwurf auf eine Reihe von Prüfungen verzichtet werden. So ist für Bauwerke in Trinkwasserschutzzonen die Prüfung der TOC-Abgabe nicht mehr erforderlich; weiterhin ist bei den organoleptischen Parametern die Geschmacksprüfung entfallen.

Eine wesentliche, konzeptionelle Änderung des Arbeitsblattes W 347 ergab sich durch die harmonisierte europäische Zementnorm EN 197. Die deutschen Trinkwasserhygieniker waren nicht bereit, die gegenüber der DIN 1164 deutlich erweiterte Palette der europäischen Zementarten ohne weitere Festlegungen für den Einsatz im Trinkwasserbereich zu akzeptieren. So haben sie zunächst gefordert, den Gesamtgehalt bestimmter Spurenelemente im Zement zu begrenzen. In intensiven Diskussionen konnte erreicht werden, dass die Spurenelementgehalte im Zement nicht als absolute „Grenzwerte“ festgelegt werden. Vielmehr wurden für einige Elemente die in **Tafel VI-4** aufgeführten zulässigen Gehalte festgeschrieben, bei deren Einhaltung keine gesonderten Auslaugprüfungen notwendig sind. Werden diese Gehalte überschritten, muss durch Auslaugprüfungen nachgewiesen werden, dass die ebenfalls in der Tafel angegebenen, maximal zulässigen Abgabemengen der entsprechenden Elemente eingehalten werden. Die Prüfung der Lithiumabgabe ist nur dann erforderlich, wenn Lithiumverbindungen als Betonzusatzmittel eingesetzt werden.

Tafel VI-4: Gesamtgehalte der Spurenelemente im Zement, bei deren Überschreitung eine Auslaugprüfung erforderlich wird, sowie die entsprechenden zulässigen Abgabemengen

Element	Gesamtgehalt im Zement in M-%	Abgabemenge in mg m ⁻² d ⁻¹
Arsen (As)	0,01	0,05
Blei (Pb)	0,05	0,1
Cadmium (Cd)	0,001	0,05
Chrom (Cr)	0,05	0,3
Nickel (Ni)	0,05	0,2
Lithium (Li)	Keine Anforderung	0,3

Die in Tafel VI-4 angegebenen Gesamtgehalte und die zulässigen Abgabemengen können von den in Deutschland hergestellten Zementen eingehalten werden. Es ist damit zu rechnen, dass die neue Ausgabe des Arbeitsblattes W 347 im Jahr 2005 durch die DVGW fertig gestellt und verabschiedet wird.

Europäisches Bewertungssystem für Bauprodukte in Kontakt mit Trinkwasser

Seit 1999 arbeiten von den EU-Mitgliedsstaaten autorisierte Trinkwasserhygieniker in der „Regulators Group for Construction Products in Contact with Drinking Water (RG-CPDW)“ an einem europäischen Bewertungssystem „European Acceptance Scheme (EAS)“ für Bauprodukte in Kontakt mit Trinkwasser. Das EAS soll für alle Bauprodukte wie Kunststoffe, Metalle, zementgebundene Werkstoffe usw. gelten, die in Kontakt mit Trinkwasser kommen. Auf der Grundlage eines EU-Mandats, dass sich auf die europäische Trinkwasser- und Bauproduktenrichtlinie bezieht, soll eine Harmonisierung der Konformitätsnachweise und der konkreten materiellen Anforderungen erreicht werden. Das zu erarbeitende europäische Bewertungssystem soll dabei auf den folgenden Prinzipien beruhen:

- Erhaltung der jeweils vorhandenen nationalen Verbraucherschutzniveaus
- Gewährleistung der Einsatzmöglichkeiten für alle üblichen Werkstoffe
- Erarbeitung eines kompletten Bewertungssystems
- Gewährleistung von Transparenz und Vertraulichkeit

Regulatorengruppe „Zement“

Während die Arbeiten für Kunststoffe und Metalle im Trinkwasserbereich unmittelbar mit der Gründung der Regulatorengruppe begannen, wurden zementgebundene Werkstoffe lange Zeit nur am Rande behandelt. Ende des Jahres 2003 wurde dann eine RG-CPDW-Untergruppe „Zement“ gegründet, die Vorschläge für Positivlisten, bewährte

Bestandteile und Bewertungskriterien erarbeiten soll. In der Untergruppe sind Regulatoren bzw. Experten aus Belgien, Deutschland, Großbritannien, Frankreich, den Niederlanden und Spanien sowie eine Delegation des für die Betonnormung zuständigen CEN/TC 104 „Beton und zugehörige Produkte“ vertreten. Für Deutschland wurde vom Bundesministerium für Gesundheit und Soziale Sicherung ein Mitarbeiter des Forschungsinstituts als Experte benannt.

Ein wesentlicher Gesichtspunkt der anstehenden Arbeiten ist die Beratung des vom CEN/TC 104 vorgeschlagenen Konzepts der Liste bewährter Bestandteile (Approved Constituent List, ACL), die für Baustellenbetone mit späterem Trinkwasserkontakt ohne Prüfung eingesetzt werden können. Zurzeit ist die ACL eine Liste von Bestandteilen, wie zum Beispiel Zemente, Betonzusatzstoffe, Betonzusatzmittel usw., die traditionell im Trinkwasserbereich eingesetzt werden und in wenigstens einem EU-Mitgliedsstaat für diesen Zweck zugelassen sind. Die Ausgangsstoffe für Betonzusatzmittel müssen außerdem in einer zu erstellenden Positivliste (PL) enthalten sein, die die toxikologische Eignung dieser Stoffe für den Einsatz im Trinkwasserbereich nachweist. Welche Daten bzw. Informationen notwendig sind, damit diese anfängliche Liste zukünftig im Rahmen des EAS anerkannt wird, ist noch nicht abzusehen. Auch steht noch nicht fest, welches Komitee bzw. welche Expertengruppe über die ACL entscheidet.

Ziel des ACL-Konzepts ist, den erforderlichen Prüfumfang für Produkte in Kontakt mit Trinkwasser auf das tatsächlich notwendige Maß zu begrenzen. Bei der Zuordnung von Stoffen zur ACL ist es hilfreich, wenn die entsprechenden Produktnormen die Anforderungen des Trinkwasserbereichs bereits berücksichtigen. Trinkwasserhygieniker beurteilen zum Beispiel organische (Zement)Zusätze (Additive) sehr kritisch. Deshalb wird bei der anstehenden Überarbeitung der harmonisierten Zementnorm EN 197-1 diskutiert, die maximal zulässige

Zugabemenge solcher Stoffe von derzeit 0,5 % auf beispielsweise 0,2 % zu reduzieren. Wird dieser Wert überschritten, muss dies deklariert werden.

Das Forschungsinstitut wirkt bei den Arbeiten zum Trinkwasserbereich intensiv mit, da die Regelungen für diesen besonders sensiblen Bereich eventuell auch für andere Einsatzgebiete zementgebundener Werkstoffe Bedeutung erlangen. So könnte das ACL-Konzept z. B. als Modell für die Ausarbeitung von Kriterien zur Einstufung als so genanntes WT-Produkt (Nachweis ohne Prüfung) im Rahmen der Bauproduktenrichtlinie dienen.

Nachhaltiges Bauen ■

Nachhaltiges Bauen heißt, ein auf die Bedürfnisse der Nutzer zugeschnittenes Bauwerk zu erstellen, das von seiner Erstellung über seine Nutzung bis zu seinem Rückbau insgesamt geringe Kosten und Umweltwirkungen verursacht. Eine Grundvoraussetzung ist die Umweltverträglichkeit des Baustoffs, d. h. sein unbedenklicher Einsatz im direkten Kontakt mit Wasser, Boden und der (Innenraum-)Luft. Darüber hinaus gehen die mit der Herstellung verbundenen Umweltwirkungen wie beispielsweise der Verbrauch an Energieträgern oder die luftgetragenen Emissionen genauso in eine umfassende Bewertung des Bauwerks ein wie die Herstellkosten. Eine Bewertung kann jedoch nur im Zusammenhang mit den über den ganzen Lebensweg hinweg verursachten Kosten und Umweltwirkungen erfolgen. Der entscheidende Beitrag eines Baustoffs zur Nachhaltigkeit liegt daher in seinem Potential, mit ihm ein gleichzeitig bedarfsgerechtes und insgesamt kosten- und umweltschonendes Bauwerk zu errichten.

Runder Tisch Nachhaltiges Bauen

Vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) wurde der Runde Tisch Nachhaltiges Bauen eingerichtet. In ihm sind die interessierten Kreise von den Baustoffherstellern über die Bauindustrie und Architekten bis hin zu den öffentlichen Bauherren vertreten. Ziel des Runden Tisches ist es, sich über die Grundsätze nachhaltigen Bauens und deren praktische Umsetzung zu verständigen. Diese sollen zunächst insbesondere in den Baumaßnahmen des Bundes angewandt werden. Damit wird die Entwicklung des nachhaltigen Bauens, die mit der Herausgabe des Leitfadens „Nachhaltiges Bauen“ im März 2001 begonnen wurde, durch das BMVBW fortgeführt.

Ein zentraler Diskussionspunkt des Runden Tisches ist die Frage, wodurch sich nachhaltiges Bauen auszeichnet. Inzwischen hat der Runde Tisch Indikatoren festgelegt, die nach Klärung einiger zurzeit noch offener Detailfragen in einer Erprobungsphase bei Bundesbaumaßnahmen in der Praxis getestet werden sollen. Die Liste dieser Indikatoren umfasst beispielsweise Kenngrößen aus der Ökobilanz. Hierzu gehören das Treibhauspotential ebenso wie die Baukosten und die Baunutzungskosten. Die thermische Behaglichkeit wird als ein Indikator für Komfort vorgeschlagen und kann als Beispiel für eine Kenngröße aus dem Bereich der sozialen Dimension dienen. Zur Beschreibung einiger spezieller Sachverhalte wie beispielsweise der Inanspruchnahme nicht-energetischer Rohstoffe besteht noch keine Einigkeit über eine sachgerechte Kenngröße. Auch wird es in einigen Fällen schwer möglich sein, spezielle Aspekte durch eine Kennziffer zu erfassen. Dies gilt zum Beispiel für die Behaglichkeit. In solchen Fällen kann eine rein verbale Beschreibung angemessener sein. Weiterhin ist zu prüfen, inwieweit die umfassende Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden künftig durch Computermodelle unterstützt werden kann. Entscheidend wird sein, dass diese Programme den am Runden Tisch erzielten Konsens zum Vorgehen unterstützen, und nicht die Umsetzung sich umgekehrt an schon existierende Programme anpasst.

Die Nutzungsdauer eines Bauwerks beeinflusst seine Nachhaltigkeitsbewertung wesentlich. Hier versucht das BMVBW die allgemein als zu pauschal angesehene tabellarische Zusammenstellung von Bauteillebensdauern durch einen differenzierten Ansatz zu ersetzen. Dazu sollen beispielweise auch in der jeweiligen Bauaufgabe durch Planung und Ausführung erzielte Steigerungen der Dauerhaftigkeit berücksichtigt werden können. Hier ist zu prüfen, ob dadurch die einzelnen Bauweisen, wie z. B. die Betonbauweise, sachgerecht behandelt werden.

Die weiteren Aktivitäten des BMVBW erstrecken sich auf die Entwicklung eines Leitfadens Nachhaltiges Bauen für den Gebäudebestand sowie auf die Herausstellung von beispielhaften Bauwerken. Der VDZ begleitet die Arbeiten gemeinsam mit dem Bundesverband der Deutschen Zementindustrie sowie mit dem Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden durch seine Mitarbeit am Runden Tisch und in dessen Arbeitskreisen.

Umweltkennzeichnung

Umweltdeklarationen sollen die mit der Herstellung eines Produkts verbundenen Umweltwirkungen dokumentieren und dadurch die Voraussetzung für eine ökologische Betrachtung ihres Lebenswegs schaffen. Solche Umweltdeklarationen enthalten im Unterschied zu herkömmlichen Umweltzeichen keine Bewertung eines Produktes. Vielmehr werden in ihnen die Umweltwirkungen, die mit der Herstellung und – soweit bekannt – mit der Nutzung eines Produkts verbunden sind, dokumentiert.

Die Umweltwirkungen werden in Ökobilanzstudien ermittelt und beruhen im Wesentlichen auf dem Verbrauch von Rohstoffen, dem Aufwand an Energie sowie auf den mit der Herstellung verbundenen Emissionen und Abfällen. Dabei werden auch die Umweltwirkungen betrachtet, die in den so genannten Vorketten, z. B. bei der Erzeugung der im Produktionsprozess benötigten Brennstoffe oder der eingesetzten Elektrizität, entstehen. Im Bauwesen tragen solche Informationen zu Bauprodukten zu einer umfassenden Betrachtung des Lebensweges von Bauwerken bei, wenn sie für alle wesentlichen Bauprodukte vorliegen. In einer sachgerechten Bewertung müssen jedoch unbedingt auch die Umweltwirkungen der Bauwerksnutzung, die häufig deutlich größer sind als die der Bauproduktherstellung, berücksichtigt werden.

Schon das Projekt „Ganzheitliche Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden (GaBi)“ entwickelte unter Mitwirkung der Zementindustrie ein Baustoffprofil, das wesentliche Elemente einer solchen Deklaration vorwegnimmt (siehe Tätigkeitsbericht 1996 - 1999). Die in **Tafel VI-5** dargestellten Inhalte einer Umweltdeklaration für Zement stimmen weitgehend mit den im GaBi-Projekt erarbeiteten Datenkategorien überein und werden inzwischen allgemein als wesentliche Bestandteile einer Deklaration in der europäischen Zementindustrie angesehen. Die Deklaration kann sich konkret auf den in einem Werk hergestellten Zement beziehen. Sie kann auch die Umweltwirkungen für einen generischen Zement, wie beispielsweise einen angenommenen nationalen oder europäischen Durchschnittszement, darstellen. In der Anwendung werden generische Daten im Allgemeinen als Information für eine Bauwerksbetrachtung ausreichend sein, um die mit einem Bauprodukt verbundenen Umweltwirkungen in die Planung einfließen zu lassen.

In Deutschland weisen auch die von der Arbeitsgemeinschaft Umweltverträgliches Bauprodukt (AUB) für andere Bauprodukte erstellten Umweltdeklarationen vergleichbare Inhalte auf. Darüber hinaus werden in diesen Umweltdeklarationen ggf. Hinweise auf die unmittelbaren Umweltwirkungen auf die Medien Wasser, Boden und insbesondere Innenraumluft gegeben. Weil die Ansätze vergleichbar sind, ist die Möglichkeit gegeben, Umweltdeklarationen für Zement zu erstellen, die mit den in Deutschland für andere Baustoffe ausgearbeiteten Deklarationen korrespondieren und zugleich in Europa weitgehend verstanden und akzeptiert werden.

Normung

Die internationale Normenorganisation ISO arbeitet schon seit mehreren Jahren an einem Normenpaket zum nachhaltigen Bauen. Dieses breit angelegte Paket betrachtet vom Grundgedanken her alle Bauwerke über ihren gesamten Lebenszyklus. Dabei werden die zur Errichtung benötigten Bauprodukte sowie die Bauwerksumgebung berücksichtigt (s. Bild VI-3). Die potentiellen Kenngrößen nachhaltigen Bauens werden in einem Normentwurf zusammengefasst, in dem die allgemein zu beachtenden ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Aspekte dargestellt und beispielhaft mit Kenngrößen illustriert werden. Die Umweltbewertung von Bauwerken als Teil der Nachhaltigkeitsbetrachtung wird in einem eigenen Normentwurf weiter konkretisiert. Darin werden sowohl Kenngrößen der Ökobilanz als auch den Innenraum betreffende Faktoren wie Lärm, Emissionen in den Innenraum oder Lichtqualität betrachtet. Am weitesten gediehen ist der Normentwurf zur Umweltdeklaration von Bauprodukten. Er geht über Vorgaben zum Inhalt der Deklaration hinaus. So behandelt der Normentwurf auch Aspekte wie die Verifikation der Deklaration oder das Vorgehen zur Ableitung von bauprodukt-spezifischen Regeln der Datenerhebung. Dabei lehnt er sich bei vielen Gesichtspunkten an die zeitgleich in Überarbeitung befindliche Norm ISO 14025 an, die die Umweltdeklaration für Produkte auch außerhalb des Baubereichs allgemein beschreibt. Soweit bekannt, ist damit das Bauwesen der erste Bereich, in dem sich das Leitbild der Nachhaltigkeit explizit in Normungsvorhaben niederschlägt.

Dennoch geht der Europäischen Kommission der von ISO verfolgte Ansatz nicht weit genug. Sie befürchtet aufgrund unterschiedlicher nationaler Entwicklungen insbesondere der Bauproduktdeklaratio-

Tafel VI-5: Datenkategorien in einer potentiellen Umweltdeklaration für Zement

Rohstoffverbrauch	<ul style="list-style-type: none"> • primäre Rohstoffe • sekundäre Rohstoffe
Wasserverbrauch	
Energieaufwand (einschließlich Elektrizität)	<ul style="list-style-type: none"> • primäre Energieträger • sekundäre Energieträger (jeweils unterteilt in erneuerbare und nicht erneuerbare Energieträger)
Potentielle Umweltwirkungen aufgrund von gasförmigen Emissionen	<ul style="list-style-type: none"> • Treibhauspotential • Versauerungspotential • Ozonabbaupotential • Photooxidantienpotential (Sommersmog) • Überdüngungspotential
Abfall zur Deponierung	<ul style="list-style-type: none"> • nicht gefährliche Abfälle • gefährliche Abfälle

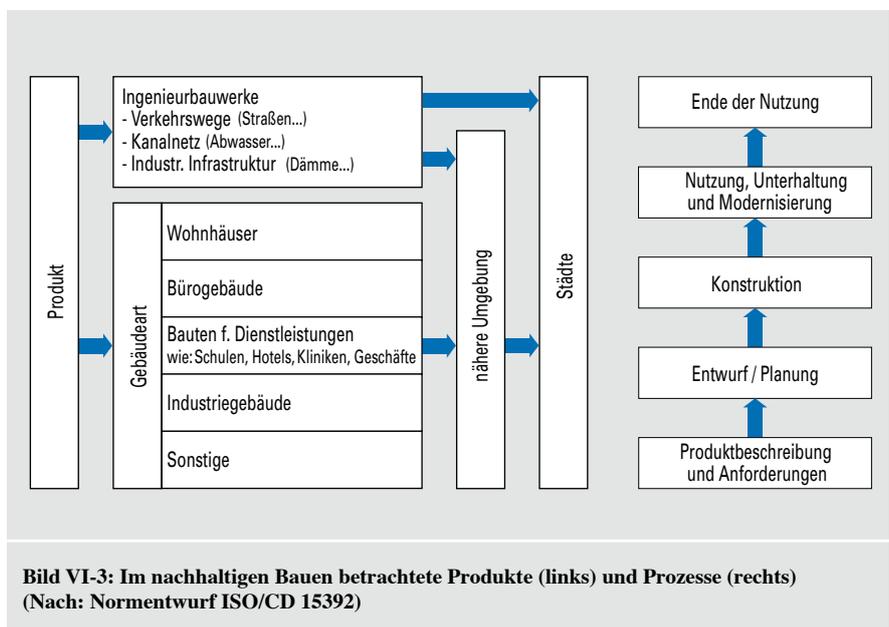


Bild VI-3: Im nachhaltigen Bauen betrachtete Produkte (links) und Prozesse (rechts) (Nach: Normentwurf ISO/CD 15392)

nen, dass Handelshemmnisse entstehen, denen durch die ISO-Normung nicht hinreichend begegnet werden kann. Infolgedessen wurde inzwischen ein Mandat an CEN gegeben, nach dem sowohl für die Umwelteleistungsbewertung von Bauwerken als auch für die Umweltdeklaration von Bauprodukten konkretere Normen entwickelt werden sollen. Dieses europäische Normenwerk soll auch eine Norm zur Ökobilanz von Bauprodukten und eine Norm zur Zusammenfassung von Ökobilanzdaten auf Bauwerksebene einschließen. Diese Normen unterliegen dabei nicht der Bauproduktenrichtlinie und verbleiben damit im freiwilligen Bereich. Dennoch ist abzusehen, dass diese Normen einen großen Einfluss auf die Umweltdeklaration von Bauprodukten in Europa haben werden.

Nachhaltiger Betonbau

Nachhaltiges Bauen kann in der Praxis nur umgesetzt werden, wenn auch konkrete

Hilfestellungen für die einzelnen Bauweisen existieren. Der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) hat es sich zum Ziel gesetzt, mittelfristig ein Grundsatzpapier zum nachhaltigen Bauen mit Beton zu erarbeiten, das diese Lücke schließen soll. Um dieses Ziel zu erreichen, hat der DAfStb ein Forschungsprojekt vorbereitet, das im Falle einer Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Jahr 2005 in einer ersten Phase anlaufen soll. Das Projekt soll u. a. der Frage nachgehen, wie die Nachhaltigkeitsbewertung konkret an den Betonbau angepasst werden kann. Daneben spricht es zentrale Fragen der Baustofftechnologie, der Bemessung und des Lebenszyklus-Managements an. Der VDZ ist mit seinem Forschungsinstitut in die Planung des Vorhabens eingebunden. Er wird sich im Falle einer Bewilligung mit einer Studie zu den Potentialen des Sekundärstoffeinsatzes im Betonbau an den Forschungsarbeiten beteiligen.

VII

Verantwortung für Mitarbeiter

Die Förderung der Arbeitssicherheit in den Zementwerken gehört zu den satzungsgemäßen Aufgaben des VDZ. Maßnahmen zur Verbesserung der Arbeitssicherheit werden vom VDZ-Ausschuss „Umwelt und Verfahrenstechnik“ entwickelt und eingeleitet. Dieser wird in seiner Arbeit vor allem durch den VDZ-Arbeitskreis „Arbeitssicherheit“ und das Forschungsinstitut unterstützt. Seit 1965 werden die Unfallzahlen in den deutschen Mitgliedswerken des VDZ erfasst und statistisch ausgewertet. Auf dieser Grundlage führt das Forschungsinstitut seit 1974 jährlich einen Arbeitssicherheits-Wettbewerb durch, bei dem die Werke mit der niedrigsten Unfallhäufigkeitsrate ausgezeichnet werden. Um die Arbeitssicherheit in den Werken zu verbessern, wurden vom Arbeitskreis „Arbeitssicherheit“ im Rahmen von Werksbesuchen aktuelle sicherheitstechnische Probleme erörtert und entsprechende Sicherheitsmerkbblätter und -Prüflisten erarbeitet. Darüber hinaus hat der Arbeitskreis ein Muster-Explosionsschutzdokument nach Betriebssicherheitsverordnung für eine Kohlenmahlanlage und ein Merkblatt zur Ladungssicherung bei Zementsackware erstellt.

Zur Weiterbildung der Mitarbeiter der Zementwerke bietet der VDZ Lehrgänge und Seminare an. In Zusammenarbeit mit der Industrie- und Handelskammer zu Düsseldorf wurde im Berichtszeitraum der 21. Industriemeister-Lehrgang „Kalk / Zement“ mit 13 Teilnehmern erfolgreich abgeschlossen. Damit kann der VDZ Anfang 2005 auf 47 Jahre erfolgreicher Weiterbildung zum Industriemeister zurückblicken. In dieser Zeit haben an 29 Lehrgängen insgesamt 808 Personen mit Erfolg teilgenommen.

Die Weiterbildung von Produktionssteuerern wurde in bewährter Weise fortgesetzt. Im Berichtszeitraum wurden 2 Lehrgänge mit insgesamt 38 Teilnehmern durchgeführt. Zusätzlich zu den bislang bereits durchgeführten Industriemeister- und Produktionssteuerer-Lehrgängen sowie den Arbeitssicherheits-Seminaren bietet der VDZ seit 1998 im Rahmen seines Weiterbildungswerks eine Reihe von ein- und mehrtägigen Seminaren an. Diese betreffen die chemische Analytik, den Immissionsschutz und die Umwelttechnik, die Verfahrenstechnik der Zementherstellung, die Überwachung der Zementqualität sowie die Grundlagen der Beton-technologie und die Betonverarbeitung. In den Jahren 2003 und 2004 wurden 9 bzw. 8 Seminare durchgeführt. Im Jahr 2005 sind 8 Seminare vorgesehen.



Arbeitssicherheit

Ergebnis der Sicherheitsarbeit

Die Verbesserung der Arbeitssicherheit in den Werken der Zementindustrie gehört zu den satzungsgemäßen Aufgaben des VDZ. Daher haben die Anstrengungen der Werke und des Forschungsinstituts einen hohen Stellenwert in der Gemeinschaftsarbeit. Die Entwicklung und Einleitung von Maßnahmen zur Verbesserung der Arbeitssicherheit sind Aufgaben des VDZ-Ausschusses „Umwelt und Verfahrenstechnik“, der in seiner Arbeit vor allem durch den VDZ-Arbeitskreis „Arbeitssicherheit“ in wirkungsvoller Weise unterstützt wird. Gemeinsames Ziel aller Bestrebungen ist es, die Mitarbeiter in den Zementwerken zu sicherheitsbewusstem Arbeiten zu motivieren, sie regelmäßig über Möglichkeiten zur Verbesserung der Arbeitssicherheit zu informieren und zu ständiger Überprüfung der Sicherheit am Arbeitsplatz aufzufordern.

Die Bemühungen des VDZ und seines Forschungsinstituts haben in besonderem Maß dazu beigetragen, dass die Unfallhäufigkeit in den deutschen Zementwerken in den letzten 30 Jahren auf ein Drittel der ursprünglichen Zahl zurückgegangen ist. Bereits 1984 lag die Unfallhäufigkeit aller Mitarbeiter auf einem sehr niedrigen Niveau von rd. 20 Unfällen je 1 Mio. geleisteter Arbeitsstunden. Die Rate entsprach etwa der der chemischen Industrie. Die mittlere Unfallhäufigkeitsrate der deutschen Zementindustrie lag im Jahr 2003 etwa 72 % unter der Unfallhäufigkeit aller Mitgliedsunternehmen der Steinbruchs-Berufsgenossenschaft (StBG) und rd. 35 % unter der durchschnittlichen Unfallhäufigkeit der gesamten gewerblichen Wirtschaft. Als Basis für den Vergleich mit den Unfallkennzahlen aller Mitgliedsunternehmen der StBG wurde die Zahl der Vollarbeiter im Betrieb verwendet, wobei 1 Vollarbeiter z. B. im Jahr 2004 rd. 1 578 Arbeitsstunden leistete.

Die wirtschaftliche Bedeutung der Arbeitssicherheit kann am besten durch die prozentuale Ausfallzeit gekennzeichnet werden, die sich durch die Arbeitsunfälle ergibt. Während vor 30 Jahren durch meldepflichtige Betriebsunfälle eine mittlere relative Ausfallzeit von etwa 0,81 % entstand, lag dieser Wert 2003 nur noch bei 0,37 %.

Tafel VII-1: Unfallkennzahlen für die Belegschaft im Betrieb der VDZ-Mitgliedswerke in den Jahren 1969, 2003 und 2004

Jahr	1969	2003	2004
Anzahl der erfassten Werke	98	51	50
Zementproduktion in Mio. t	34,3	32,7	32,0
Belegschaft im Betrieb			
Anzahl der Arbeitnehmer	15 190	5 921	5 406
Geleistete Arbeitsstunden	31 339 177	9 731 058	9 083 004
Produktionsbezogener Lohnstundenaufwand in h/t	0,91	0,30	0,28
Meldepflichtige Betriebsunfälle	1 376	127	138
Unfallhäufigkeitsrate (Unfälle je 1 Mio. Arbeitsstunden)	43,90	13,05	15,19
Kalenderausfalltage durch meldepflichtige Betriebsunfälle	31 935	3 834	4 279
Ausgefallene Arbeitstage je Arbeitnehmer	2,10	0,65	0,79
Kalenderausfalltage je Betriebsunfall	23,20	30,19	31,01
100-Mann-Quote (Unfälle je 100 Arbeitnehmer)	9,10	2,14	2,55
Meldepflichtige Wegeunfälle	180	24	20
Kalenderausfalltage durch meldepflichtige Wegeunfälle	5 822	711	599
Unfallhäufigkeitsrate der Gesamtbelegschaft	37,70	11,50	13,09

VDZ-Unfallstatistik

Seit 1965 werden die Zahlen der meldepflichtigen Betriebs- und Wegeunfälle in den deutschen Mitgliedswerken vom Forschungsinstitut jährlich erfasst und statistisch ausgewertet. Die wichtigsten Ergebnisse und Kennzahlen der Unfallstatistiken aus den Jahren 2003 und 2004 sind in **Tafel VII-1** zusammengestellt. Zum Vergleich und zur Kennzeichnung der Entwicklung des Unfallgeschehens wurden in der ersten Spalte der Tabelle die entsprechenden Zahlen des Jahres 1969, in dem erstmalig die Unfälle der Zementindustrie statistisch ausgewertet wurden, mit aufgeführt. Um der Entwicklung der Personalstruktur in den Betrieben Rechnung zu tragen, bilden vom Jahr 1993 an nicht mehr die gewerblichen Arbeitnehmer, sondern die Gesamtbelegschaft im Betrieb die Grundlage für die Berechnung der Unfallstatistik. Die Belegschaft im Betrieb hat im Jahr 2003 um 15,5 % und im Jahr 2004 um 8,7 % – jeweils gegenüber dem Vorjahr – abgenommen. Etwas geringer ging die Zahl der geleisteten Arbeitsstunden im Jahr 2003 um 12,0 % und im Jahr 2004 um 6,7 % zurück. Aus diesem Grund hat die Zahl der jährlich pro Arbeitnehmer geleisteten Arbeitsstunden von rd. 1 578 im Jahr 2002 auf 1 643 im Jahr 2003 und 1 680 im Jahr 2004 zugenommen. Aus der Tafel geht hervor, dass die Produktion im Berichtszeitraum von 32,7 Mio. t im Jahr 2003 auf 32,0 Mio. t in 2004 zurück-

gegangen ist. Daraus ergibt sich der produktionsbezogene Arbeitsstundenaufwand von 0,30 h/t im Jahr 2003 und 0,28 h/t im Jahr 2004. Die Zahl der meldepflichtigen Betriebsunfälle stieg von 127 im Jahr 2003 auf 138 im Jahr 2004, d.h. um rd. 8,7 %. Die mittlere Unfallhäufigkeitsrate (Zahl der meldepflichtigen Betriebsunfälle je 1 Mio. Arbeitsstunden) aller Werke lag im Jahr 2003 mit 13,05 erfreulich nah am 2001 erzielten Tiefststand von 12,81. Im Jahr 2004 war ein leichter Anstieg auf 15,19 zu verzeichnen. Sowohl im Jahr 2003 als auch im Jahr 2004 konnten jeweils 8 Werke mit Klinkerproduktion eine Unfallhäufigkeitsrate von 0,0 erreichen (**Tafel VII-2**). Für die gewerblichen Arbeitnehmer und die Gesamtzahl der Angestellten gemeinsam ergab die Rechnung für das Jahr 2003 eine Unfallhäufigkeitsrate von 11,50 und für das Jahr 2004 von 13,09.

Die durchschnittliche Zahl der durch meldepflichtige Betriebsunfälle verursachten Kalenderausfalltage hat sich von 30,19 im Jahr 2003 um 2,7 % auf 31,01 in 2004 erhöht. Die wirtschaftliche Bedeutung der Betriebsunfälle lässt sich auch mit Hilfe des Jahresleistungsausfalls beurteilen. Diese Kennzahl gibt die durch meldepflichtige Betriebsunfälle verursachte Zahl der Kalenderausfalltage bezogen auf die Zahl der Mitarbeiter im Betrieb an. Der mittlere Jahresleistungsausfall ist von 0,65 im Jahr 2003 auf 0,79 in 2004 leicht

gestiegen. Die 100-Mann-Quote – das ist die Zahl der Betriebsunfälle bezogen auf 100 Mitarbeiter im Betrieb – lag mit 2,14 im Jahr 2003 und 2,55 in 2004 weiterhin auf einem niedrigen Niveau. Im Vergleich dazu ergab sich z. B. für die bei der Steinbruchs-Berufsgenossenschaft versicherten Unternehmen im Jahr 2003 eine 100-Mann-Quote von 5,09, entsprechend einer Unfallhäufigkeitsrate von 33,27. Die Zahl der meldepflichtigen Wegeunfälle sank im Berichtszeitraum leicht von 24 im Jahr 2003 auf 20 im Jahr 2004.

Förderung der Arbeitssicherheit

In den vergangenen 2 Jahren wurden 5 Sicherheits-Merkblätter (Nr. 95 bis 99) mit den Beschreibungen typischer und besonders bemerkenswerter Betriebsunfälle und ein Sicherheits-Merkblatt zum Thema Ladungssicherung bei Zementsackware sowie 6 Sicherheits-Prüflisten (Nr. 75 bis 100) für die Überprüfung von Einrichtungen und Maßnahmen zur Verbesserung der Arbeitssicherheit in verschiedenen Betriebsbereichen herausgegeben.

Seit nunmehr 28 Jahren werden jährlich die Mitgliedswerke mit Klinkerproduktion ausgezeichnet, die jeweils die niedrigsten Unfallhäufigkeitsraten erzielt haben (Tafel VII-2 und Bild VII-1). Die Auszeichnung besteht aus einer Tafel und dem Symbol für die Sicherheitsarbeit des VDZ, dem Sechseck mit der Inschrift „Sicher arbeiten – VDZ“. Die Tafel enthält die Anerkennung für die Bemühungen von Leitung und Belegschaft des Werks um die Arbeitssicherheit. Die Auszeichnung soll darüber hinaus die Mitarbeiter motivieren und das Sicherheitsbewusstsein in den Werken fördern.

Da sich die Gefährdungspotentiale für die Mitarbeiter in den Werken mit Klinkerproduktion von denen der Mitarbeiter in Werken ohne Klinkerproduktion deutlich unterscheiden, ist die Anwendung eines einheitlichen Maßstabs für die Beurteilung der Arbeitssicherheit aller Werke nur eingeschränkt möglich. Um jedoch auch in den Mahlwerken die Motivation zur Verbesserung der Arbeitssicherheit zu stärken, wird seit 1995 für diese Werksgruppe ein besonderer Arbeitssicherheits-Wettbewerb durchgeführt. Die Mahlwerke mit den niedrigsten Unfallhäufigkeitsraten werden mit einer entsprechenden Urkunde ausgezeichnet.

Tafel VII-2: Im VDZ-Arbeitssicherheits-Wettbewerb ausgezeichnete Werke mit Klinkerproduktion in den Jahren 2003 und 2004

	2003	2004
1. Platz	Dyckerhoff AG Werk Mainz-Amöneburg Unfallhäufigkeitsrate: 0,0	Dyckerhoff AG Werk Geseke Unfallhäufigkeitsrate: 0,0
	Dyckerhoff AG Werk Göllheim Unfallhäufigkeitsrate: 0,0	Dyckerhoff AG Werk Lengerich Unfallhäufigkeitsrate: 0,0
	Dyckerhoff AG Werk Neubeckum Unfallhäufigkeitsrate: 0,0	Dyckerhoff AG Werk Neubeckum Unfallhäufigkeitsrate: 0,0
	HeidelbergCement AG Werk Burglengenfeld Unfallhäufigkeitsrate: 0,0	HeidelbergCement AG Werk Schelklingen Unfallhäufigkeitsrate: 0,0
	HeidelbergCement Produktionsgesellschaft mbH & Co KG Werk Wetzlar Unfallhäufigkeitsrate: 0,0	HeidelbergCement AG Werk Mainz-Weisenau Unfallhäufigkeitsrate: 0,0
	Karsdorfer Zement GmbH Werk Sötenich Unfallhäufigkeitsrate: 0,0	Holcim (Deutschland) AG Werk Höver Unfallhäufigkeitsrate: 0,0
	Readymix Westzement GmbH Werk Beckum Kollenbach Unfallhäufigkeitsrate: 0,0	Lafarge Zement Karsdorf GmbH Werk Sötenich Unfallhäufigkeitsrate: 0,0
	Readymix Westzement GmbH Werk Beckum Mersmann Unfallhäufigkeitsrate: 0,0	Rüdersdorfer Zement GmbH Werk Rüdersdorf Unfallhäufigkeitsrate: 0,0
2. Platz	Rüdersdorfer Zement GmbH Werk Rüdersdorf Unfallhäufigkeitsrate: 1,88	Lafarge Zement Karsdorf GmbH Werk Karsdorf Unfallhäufigkeitsrate: 3,48
3. Platz	Dyckerhoff AG Werk Lengerich Unfallhäufigkeitsrate: 2,18	Schwenk Zement KG Werk Allmendingen Unfallhäufigkeitsrate: 5,22



**Bild VII-1:
Auszeichnung
der Sieger im
VDZ-Arbeitssi-
cherheits-Wett-
bewerb 2003**

Sicherheitsseminare

Der Verlauf der Unfallkennzahlen während der letzten Jahre zeigt deutlich, dass sich die erheblichen Bemühungen der Werke mit Unterstützung durch den Arbeitskreis und das Forschungsinstitut merklich auf die Verbesserung der Arbeitssicherheit ausgewirkt haben. Zur weiteren Steigerung der Arbeitssicherheit dürfen die Anstrengungen aller Mitarbeiter aber nicht nachlassen, sondern müssen noch verstärkt werden. Entscheidend dafür ist insbesondere die Motivation der Mitarbeiter, die Sicherheitsvorschriften im Betrieb richtig anzuwenden und vor allem durchzusetzen. Hierfür sind die Führungskräfte im Betrieb, die Werksleiter, Betriebsleiter und in besonderem Maß die Meister und Vorarbeiter verantwortlich. Durch den ständigen Kontakt zu seinen Mitarbeitern hat das vorbildliche Verhalten des Industriemeisters den größten Einfluss auf die Verbesserung der Arbeitssicherheit im Betrieb. Diese Erkenntnis hat den VDZ veranlasst, auf Empfehlung des Arbeitskreises „Arbeitssicherheit“ Intensiv-Schulungen für die in der Praxis stehenden Meister und Vorarbeiter anzubieten. Ziel der Seminare ist die Verbesserung der Kenntnisse über sicheres Arbeiten vor allem in Bereichen mit höherem Unfallrisiko, die Erörterung bemerkenswerter Unfälle und das Vermitteln von Anregungen für eigene Maßnahmen zur Verbesserung der Arbeitssicherheit. Die Seminare werden gemeinsam von der Steinbruchs-Berufsgenossenschaft (StBG) und dem Verein Deutscher Zementwerke e. V. (VDZ) getragen. Sie werden vom VDZ-Arbeitskreis „Arbeitssicherheit“ und der StBG gemeinsam gestaltet, dauern jeweils etwa 2 Tage und werden in Gruppen von 15 bis 20 Teilnehmern außerhalb der Betriebe von Seminarleitern der StBG organisiert und durchgeführt. Die Seminare werden seit 1993 als Dauereinrichtung mit 6 Veranstaltungen pro Jahr angeboten. Die Referenten sind dafür qualifizierte Mitarbeiter der StBG. Die in bestimmten Zeitabschnitten wechselnden Programmt Themen werden vor allem vom VDZ-Arbeitskreis „Arbeitssicherheit“ zusammengestellt und ausgearbeitet.

Muster-Explosionsschutzdokument

Seit 2002 ist die Betriebssicherheitsverordnung in Kraft und muss jetzt in die Praxis umgesetzt werden. Nach § 6 der Betriebssicherheitsverordnung hat der Arbeitgeber sicherzustellen, dass ein Explosionsschutzdokument erstellt und auf dem aktuellen Stand gehalten wird. Aus diesem Dokument muss insbesondere hervorgehen, dass:

- die Explosionsgefährdungen ermittelt und einer Bewertung unterzogen worden sind,
- angemessene Vorkehrungen getroffen werden, um den Explosionsschutz sicherzustellen,
- die Bereiche in Zonen eingeteilt wurden und
- in den Bereichen die Mindestvorschriften eingehalten werden.

Im Zementwerk können folgende Bereiche explosionsgefährdet sein: Gasregelstation, Gastanks, Benzintanks, Kohlenstaubsilos, Brennstoffsilos, Kohlenmahlanlage und Teile von Sekundärbrennstoffanlagen. Bei Neuanlagen muss ein Explosionsschutzdokument vor Inbetriebnahme der Anlage erstellt werden. Für Altanlagen ist die Erstellung eines solchen Dokuments bis zum 31. 12. 2005 erforderlich. Der Arbeitskreis Arbeitssicherheit hat ein Muster-Explosionsschutzdokument am Beispiel einer Kohlenmahlanlage erarbeitet, das als Vorlage benutzt werden kann. Im Explosionsschutzdokument müssen die explosionsgefährdeten Bereiche nach Häufigkeit und Dauer des Auftretens von gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre in Zonen unterteilt werden. Der Arbeitskreis empfiehlt, die Zoneneinteilung im konkreten Fall von einem Sachverständigen prüfen zu lassen. Außerdem muss das Dokument eine Kurzbeschreibung der Verfahrenstechnik und der baulichen Gegebenheiten, Angaben zu Explosionskenngrößen der eingesetzten Stoffe sowie eine Auflistung der technischen und organisatorischen Schutzmaßnahmen enthalten.

Ladungssicherung bei Zementsackware

Fehlende oder unzureichende Ladungssicherung ist eine der häufigsten Unfallursachen im LKW-Verkehr und führt zu beträchtlichen Sach- und Personenschäden. Von der Polizei werden zunehmend Kontrollen der Ladungssicherung durchgeführt und unzureichende Ladungssicherung mit Bußgeldbescheiden und Punkten im Flensburger Verkehrszentralregister gegenüber Spediteuren und Verladern geahndet. Grundsätzlich sind alle am Transport beteiligten Personen für die Ladungssicherung beim Zementversand verantwortlich – der Spediteur, der Fahrer und der Verloader. Der Spediteur muss ein geeignetes Fahrzeug und Sicherungsmittel zur Verfügung stellen. Der Fahrer hat die Pflicht, die Zurr- und Hilfsmittel richtig anzuwenden. Der Verloader ist für die verkehrssichere Verstauung der Ladung verantwortlich. Es empfiehlt sich, eine gemeinsame Lösung dieses Problems im Rahmen einer engen

Zusammenarbeit zwischen Verloader und Spediteur zu suchen.

Der Arbeitskreis Arbeitssicherheit hat sich mit den Fragen der Ladungssicherung beschäftigt und ein Merkblatt zu diesem Thema erstellt. Je nach Fahrzeugtyp sind unterschiedliche Sicherungsmaßnahmen notwendig. Bei Fahrzeugen mit Schüttgutaufbau ist kein Niederzurren der Paletten erforderlich, sofern eine formschlüssige Beladung in und entgegen der Fahrtrichtung sowie zur Seite gewährleistet ist. Ist eine formschlüssige Beladung zur Seite nicht möglich, ist auch bei diesen Fahrzeugen die Ladung durch eine rutschhemmende Unterlage oder eine Niederzurrung der Paletten zu sichern. Die Festigkeit der Ladebordwände muss jedoch nachgewiesen werden. Bei Fahrzeugen ohne seitliche Laderaumbegrenzung (z. B. Schiebepalen) oder bei Fahrzeugen ohne nachgewiesene ausreichende Festigkeit der Ladebordwände muss zwischen Paletten ohne Folienumhüllung, verklebten Säcken und Paletten mit Folienumhüllung unterschieden werden. In allen Fällen sollte die Beladung in und entgegen der Fahrtrichtung formschlüssig erfolgen und die Stirnhöhe größer sein als die Ladehöhe. Paletten mit Folienumhüllung bzw. verklebten Säcken sind durch einen Zurrurt je Palettenreihe mit einer Vorspannkraft von 400 daN zu sichern. Paletten ohne Folienumhüllung sind mit 2 Zurrurten je Palettenreihe mit entsprechender Vorspannkraft zu sichern, wobei Hölzer oder Kantenschutz mit eingezurt werden sollte, um ein Einschneiden der Gurte zu verhindern. Wenn kein Formschluss nach vorne erfolgen kann oder für die Stirnhöhe nicht die erforderliche Festigkeit von 4 500 daN bei LKW bzw. 7 500 daN bei Sattelanhängern nachgewiesen ist, sind Antirutschmatten und diagonale Verzurrungen in und entgegen der Fahrtrichtung erforderlich.

VDZ-Weiterbildungswerk

Industriemeister-Lehrgang

Der VDZ bietet Lehrgänge und Seminare zur Weiterbildung der Mitarbeiter der Zementwerke an. Seit 1958 führt er in Zusammenarbeit mit der Industrie- und Handelskammer zu Düsseldorf Industriemeister-Lehrgänge durch. Bis 1965 wurden 8 Lehrgänge abgehalten, die von insgesamt 274 Industriemeistern der Fachrichtung „Zement“ mit Erfolg abgeschlossen wurden. Seit 1965 werden vom VDZ gemeinsam mit dem Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie die im deutschsprachigen Raum einmaligen Industriemeister-Lehrgänge der Fachrichtung

„Kalk / Zement“ angeboten. Bis März 2005 haben an 21 Industriemeister-Lehrgängen „Kalk / Zement“ 534 Personen mit Erfolg teilgenommen (Bild VII-2 und Tafel VII-3). Insgesamt kann der VDZ damit auf 47 Jahre erfolgreicher Weiterbildung zum Industriemeister zurückblicken. Anfang 2005 wurde durch eine Umfrage das Interesse der Werke an einem geplanten 22. Industriemeister-Lehrgang festgestellt, der im Herbst 2005 beginnen und im März 2007 enden würde. Die Lehrgänge werden als Internats-Lehrgänge in den Räumen der Schulungsstätte in Düsseldorf-Hassels durchgeführt.

Produktionssteuerer-Lehrgang

Um den zunehmenden Anforderungen an die Qualifikation von Leitstandsfahrern gerecht zu werden, hatte der VDZ im Jahr 1990 beschlossen, Produktionssteuerer-Lehrgänge einzurichten. Diese Weiterbildungsmaßnahme hat zum Ziel, dem Leitstandspersonal den heutigen Kenntnisstand in der Verfahrens- und Umwelttechnik der Zementherstellung sowie in der Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik im Zementwerk zu vermitteln. Den Leitstandsfahrern soll die Anpassung an die durch Automation und durch Neuentwicklungen eingetretenen Veränderungen der Produktionssteuerung erleichtert werden, so dass ein zuverlässiger und effektiver Betrieb der Zementwerksanlagen sichergestellt ist. Die Gesamtmaßnahme umfasst einen theoretischen Teil, der vom VDZ angeboten wird, sowie einen praktischen Teil, der im Zementwerk zu absolvieren ist. Bis 2004 wurden in insgesamt 11 Lehrgängen 248 Personen zu Produktionssteuerern „Zement“ weitergebildet. Der nächste Lehrgang wird in der Zeit von April bis September 2005 in der Schulungsstätte Düsseldorf-Hassels durchgeführt. Der Lehrgang umfasst ein Vorseminar und 240 Unterrichtsstunden, die auf 3 Internatsabschnitte verteilt werden.

Lehrbriefe

Zur Weiterbildung der Produktionsmitarbeiter in den Werken und zur Betreuung der auszubildenden Verfahrensmechaniker wurden in den vergangenen Jahren Lehrbriefe erstellt. Nachdem die ersten 10 Lehrbriefe auf eine sehr große Resonanz gestoßen waren, konnten nunmehr 21 weitere Lehrbriefe fertig gestellt werden. Sie sind sowohl in digitaler Form auf CD als auch in gedruckter Form als Papier- und Foliensatz verfügbar und können über die VDZ-Internet-Seite bezogen werden.



Bild VII-2: Industriemeister „Kalk / Zement“ nach bestandener Abschlussprüfung im März 2005

Tafel VII-3: Absolventenzahl der Industriemeister-Lehrgänge

Lehrgang	Jahr	Zement	Kalk	Gesamt	
Zement	1 bis 8	1958/1959 bis 1964/1966	229	45	274
	Kalk / Zement	1 bis 11	1965/1967 bis 1985/1987	225	65
12		1987/1989	22	3	25
13		1989/1991	20	10	30
14		1991/1993	20	10	30
15		1992/1994	24	6	30
16		1993/1995	26	3	29
17		1995/1997	24	2	26
18		1997/1999	21	2	23
19		1999/2001	21	2	23
20		2001/2003	13	2	15
21		2003/2005	13	0	13
Summe		204	40	244	
Insgesamt		658	150	808	

Die von der VDZ-Arbeitsgruppe „Lehrbriefe“ ausgearbeiteten Schulungsunterlagen, die so genannten „Lehrbriefe“, bestehen jeweils aus einem Textteil und einem Bildteil (Foliensatz). Sie sollen geeigneten Werksmitarbeitern (Ausbildern) als Ausbildungshilfe dienen. Thematisch befassen sich die Lehrbriefe mit dem gesamten Zementherstellungsprozess von der Rohmaterialgewinnung bis hin zur Zementverladung. Dabei werden vor allem die Bereiche behandelt, die sich auf die Produktionsabläufe in den Werken be-

ziehen und mit der Tätigkeit der Produktionsmitarbeiter in engem Zusammenhang stehen. Eine Übersicht über die behandelten Themen, die Liste der bereits fertig gestellten Lehrbriefe (CD 1 bis 3) sowie der in Vorbereitung befindlichen Schulungsunterlagen können der **Tafel VII-4** entnommen werden. Beispiele einzelner Lehrbriefe können darüber hinaus auf der Intranet-Seite des VDZ eingesehen werden. Die derzeit in Vorbereitung befindlichen Lehrbriefe werden voraussichtlich im 3. Quartal 2005 (CD 4) fertig gestellt sein.

Tafel VII-4: Thematische Auflistung der Inhalte der Lehrbriefe

Themen der Lehrbriefe		CD 1	CD 2	CD 3	CD 4*
1	Rohmaterial-Gewinnung				
1.1	Lösen, Laden, Transportieren	X			
1.2	Wasserhaltungsanlagen				X
1.3	LKW-Waschanlagen		X		
2	Rohmaterialaufbereitung				
2.1	Vorzerkleinerung				X
2.2	Mischbett und Einsatzstoffe			X	
2.3	Mahlrocknungsanlagen für Rohmaterial	X			
2.4	Rohmehl-Homogenisieranlage				X
3	Klinkerproduktion				
3.1	Drehrohrofen	X			
3.2	Feuerungen	X			
3.3	Vorwärmer			X	
3.4	Calcinator				X
3.5	Bypass				X
3.6	Klinkerkühler			X	
3.7	Brennstoffe	X			
3.8	Brand- und Explosionsschutz				X
4	Zementproduktion				
4.1	Zementmahanlage	X			
4.2	Rohrmühlen			X	
4.3	Wälzmühlen			X	
4.4	Gutbettwalzenmühlen			X	
4.5	Sichter			X	
4.6	Zement-Kühlung				X
4.7	Zement-Mischanlage				X
4.8	Zement-Einsatzstoffe, Produktprogramm, Zementanwendung	X			
5	Packerei und Versand				
5.1	Packmaschine		X		
5.2	Palettiermaschine		X		
5.3	Zementlagerung		X		
5.4	Verladeeinrichtung		X		
6	Allgemeine Betriebseinrichtungen				
6.1	Mechanische Stetigförderer	X			
6.2	Pneumatische Förderer			X	
6.3	Prozessmesstechnik			X	
6.4	Dosiereinrichtungen		X		
6.5	Antriebstechnik				X
6.6	Druckluft-Versorgung			X	
6.7	Kühlwasser-Versorgung				X
6.8	Stromversorgung, Niederspannung		X		
6.9	Stromversorgung, Hoch- und Mittelspannung		X		
7	Umweltschutz				
7.1	Gesetze und Verordnungen				X
7.2	Minderung von Staubemissionen	X			
7.3	Minderung von Gasemissionen				X
7.4	Lärmschutz		X		
7.5	Abfall-Entsorgung				X
7.6	Abwasser-Entsorgung				X
7.7	Rekultivierung, Renaturierung		X		
7.8	Umweltmesstechnik				X
8	Qualitätsmanagement / Qualitätssicherung				
8.1	Qualitätsmanagement / Qualitätssicherung	X			
8.2	Probenahmeeinrichtungen			X	

* in Vorbereitung (geplante Fertigstellung CD 4: 3. Quartal 2005)

Weiterbildungs-Seminare

Erstmals hat der VDZ im Jahr 1998 im Rahmen seines Weiterbildungsangebots zusätzlich zu den bislang bereits durchgeführten Industriemeister- und Produktionssteuerer-Lehrgängen sowie den Arbeitssicherheits-Seminaren eine Reihe von ein- und mehrtägigen Seminaren angeboten, die die chemische Analytik, den Immissionsschutz und die Umwelttechnik, die Verfahrenstechnik der Zementherstellung, die Überwachung der Zementqualität sowie die Grundlagen der Betontechnologie und die Betonverarbeitung betreffen. Das Programm ist als Einführung für junge sowie als Fortbildung für bereits länger in der Zementindustrie tätige Mitarbeiter der VDZ-Mitgliedswerke gedacht. Es wurde den Mitgliedswerken sowohl in Form einer Broschüre als auch über das Internet bekannt gemacht.

Gemäß den Anforderungen der 5. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (5. BImSchV) müssen Immissionsschutzbeauftragte mindestens alle 2 Jahre an Fortbildungsmaßnahmen teilnehmen. Während bei Grundlehrgängen für Immissionsschutzbeauftragte alle Bereiche des Umweltschutzes behandelt werden, können bei Fortbildungsveranstaltungen Schwerpunktthemen gewählt werden. Vom VDZ wurden inzwischen 6 solcher Fortbildungsseminare ausgerichtet, die speziell auf die Belange der Zementindustrie zugeschnitten waren. Dabei standen jeweils aktuelle Entwicklungen im deutschen und europäischen Umweltrecht, Emissionen von organischen Verbindungen und Spurenelementen und die Minderung der CO₂-Emissionen beim Klinkerbrennprozess im Mittelpunkt. Das Seminar ist als Fortbildungsmaßnahme im Sinne der 5. BImSchV durch das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen staatlich anerkannt und wird im Abstand von 2 Jahren mit jeweils aktuellen Themen durchgeführt.

Das Seminar „Einführung in die Umwelttechnik“ wird ebenfalls im Abstand von 2 Jahren, abwechselnd mit dem Fortbildungsseminar für Immissionsschutzbeauftragte, durchgeführt. Das wegen mangelnder Nachfrage 2003 ausgefallene Seminar wird 2005 erneut angeboten. Im Seminar wird eine Einführung in alle Teilbereiche des Umweltschutzes und der Umwelttechnik gegeben. Dabei wurden die Themen Umweltrecht, Emissionsmesstechnik, Minderung von Gas-, Staub- und Schwermetallemissionen sowie von Lärm und Erschütterungen, ökologische Verwertung von

Abfällen und produktionsintegrierter Umweltschutz behandelt. Die Vorträge werden durch praktische Übungen zur Emissions- und Immissionsmesstechnik ergänzt. Das Seminar hat die staatliche Anerkennung als Grundlehrgang für zukünftige Immissionschutzbeauftragte.

Ziel des 4-tägigen Seminars „Junge Betriebsingenieure“ ist es, einen möglichst umfassenden Überblick über alle Bereiche der Zementherstellung bis hin zur Zementanwendung im Beton zu vermitteln. Dementsprechend werden verfahrenstechnische Themen, chemisch-mineralogische Fragestellungen, das Umweltrecht, die umweltverträgliche Zementherstellung, die Umweltmesstechnik, die Qualitätssicherung und die Betonbautechnik intensiv behandelt. Das bisher jährlich stattfindende Seminar wird ab 2004 in 2-jährigem Abstand angeboten. Das nächste Seminar wird 2006 stattfinden.

Bei dem in Jahr 2003 durchgeführten 2-tägigen Seminar „Industriemeister-Praxis“ wurden die modernen Methoden der Gewinnungs-, Aufbereitungs- und Brenntechnik sowie deren Einflüsse auf die Klinker- und Zementeigenschaften und die Emissionen erörtert. Ferner gehören die wesentlichen und neuen Aspekte des Arbeits- und Gesundheitsschutzes, des Arbeits- und Sozialrechts, der Mitarbeiterführung sowie die Grundlagen für kostenbewusstes Handeln zu den Inhalten dieses Seminars.

Die praxisbezogene berufliche Weiterbildung soll mit dem 2005 erstmals angebotenen Seminar „Aus der Praxis für die Praxis“ verstärkt werden. Zielgruppe des Seminars sind insbesondere in der Praxis stehende Industriemeister und Produktionssteuerer. Die Teilnehmer erwerben vertiefte Kenntnisse der modernen Entwicklungen in der Verfahrenstechnik und der Zementherstellung. Darauf aufbauend wird den

Teilnehmern vermittelt, wie betriebsnahe Schulungen von Produktionsmitarbeitern auf Basis der Lehrbriefe durchgeführt werden können.

Zum Thema „Überwachung der Zementqualität“ werden jährlich 4 Seminare angeboten. Zielgruppe dieser Seminare sind Laborleiter und verantwortliche Labormitarbeiter der Werke. Im 1-tägigen Seminar „Röntgenfluoreszenz (RFA)“ werden den Teilnehmern vertiefte Kenntnisse der RF-Analysentechnik vermittelt. Im 2-tägigen Seminar „Technische Mineralogie“ wird dargestellt, wie die chemisch-mineralogischen Eigenschaften von Zementrohstoffen, Klinker, Zement und Beton anhand mikroskopischer und röntgendiffraktometrischer Untersuchungsmethoden bestimmt werden, und wie die Ergebnisse zu beurteilen sind. Neben der Erläuterung der technischen Grundlagen der Analysensysteme werden insbesondere praktische Übungen durchgeführt. Im 2-tägigen Seminar „Prüfungen nach DIN EN 196“ werden die in der Norm festgelegten physikalischen und chemischen Prüfungen an Zementen und zementartigen Bindemitteln bzw. den Roh- und Ausgangsstoffen vorgestellt. Auf die Einhaltung einer normgerechten Arbeitsweise und die Ermittlung und Vermeidung von Fehlerquellen wird dabei besonderer Wert gelegt. Schwerpunkt eines weiteren 1-tägigen Seminars war die Bestimmung des Hüttensandgehalts in Zementen nach dem kombinierten mikroskopisch-chemischen Verfahren. Dieses Seminar wird 2005 durch ein neues 1-tägiges Seminar „Bestimmung des Hüttensandgehalts – methodischer Überblick“ ergänzt. Dabei wird den Teilnehmern ein Überblick über die möglichen Verfahren zur Bestimmung des Hüttensandgehalts in Zement vermittelt.

Auf dem Gebiet „Zementanwendung“ wurde das 2-tägige Seminar „Grundlagen der Betonbautechnik“ im Abstand von 2 Jahren abwechselnd mit dem ebenfalls 2-tägigen

Seminar „Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen“ durchgeführt. Ab dem Jahr 2004 wurden beide Seminare zu einem 2-tägigen Seminar zusammengefasst, das nunmehr jährlich angeboten wird. Im ersten Teil des Seminars werden den Teilnehmern die Grundlagen der Betontechnologie und der Betonbautechnik dargelegt. Besondere Berücksichtigung finden dabei die Auswirkungen der neuen Normen DIN 1045 und DIN EN 206-1. Praktische Vorführungen im Betonlabor dienen zur Veranschaulichung der theoretischen Ausführungen. Darüber hinaus wird auf baupraktische Fragen wie die Verarbeitung von Beton auf der Baustelle und im Betonwerk sowie Transport, Förderung, Einbau und Verdichtung von Beton eingegangen. Im zweiten Teil des Seminars wird die Dauerhaftigkeit von Beton- und Stahlbetonbauteilen behandelt. Ziel dieses Teils ist es unter anderem, unter Berücksichtigung von Einwirkung und Widerstand Verformungs-, Transport- und Schadensmechanismen beurteilen zu können. Aufbauend auf den Ausführungen zur elastischen und plastischen Verformung des Betons werden lastfreie Verformungen des Betons aus Schwinden und Hydrationswärmeentwicklung behandelt sowie die Möglichkeiten zur Verminderung der Rissbildung in Bauteilen aufgezeigt. Unter dem Thema „Betonkorrosion“ werden der Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand, der Widerstand gegen Säure- und Sulfatangriff sowie gegen die schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion behandelt. Das in neuen Normenwerken festgelegte Konzept der Expositionsklassen (z.B. Frost XF1 bis XF4) und die Auswirkungen auf die zu wählende Betonzusammensetzung werden erläutert und die Prüfverfahren zur Beurteilung des Widerstands von Beton in praktischen Vorführungen demonstriert.

Insgesamt wurden im Jahr 2003 vom Forschungsinstitut 9 und im Jahr darauf 8 Seminare angeboten. Für das Jahr 2005 sind wieder 8 Seminare vorgesehen.

Veröffentlichungen

Schriftenreihe der Zementindustrie

- Boos, Peter *Herstellung dauerhafter zementgebundener Oberflächen im Trinkwasserbereich: Korrosionsanalyse und technische Grundanforderungen*
Düsseldorf: Verl. Bau+Technik, 2003. - (Schriftenreihe der Zementindustrie; 64); ISBN 3-7640-0449-5
- Rickert, Jörg *Zum Einfluss von Langzeitverzögerern auf der Basis von Phosphonsäure auf die Hydratation einzelner Klinkerphasen, Portlandzementklinker und Portlandzemente*
Düsseldorf: Verl. Bau+Technik, 2004. - (Schriftenreihe der Zementindustrie; 65); ISBN 3-7640-0466-5

Merkblätter

Ausschuss Verfahrenstechnik

- Arbeitskreis „Betriebsverhalten von Vorcalcinieranlagen“
Arbeitskreis „SO₂-Minderung / Stoffkreisläufe“

Sicherheits-Merkblätter

- Nr. 94 Augenverletzung bei Reinigungsarbeiten im Wärmetauscher
Nr. 95 Arbeitsunfall im Bereich der Packerei
Nr. 96 Beinaheunfall bei Feuerfest-Reparaturen im Wärmetauscher
Nr. 97 Sturzunfall von einer Treppe
Nr. 98 Unfall an einer Schlagschere
Nr. 99 Tödlicher Unfall bei Becherwerksreparatur

Sicherheits-Prüflisten

- Nr. 74 Augenschutz
Nr. 75 Verkehrswege
Nr. 76 Feuerfest-Reparaturen im Wärmetauscher
Nr. 77 Treppen
Nr. 78 Schlagscheren
Nr. 79 Arbeiten an Becherwerken

VDZ-Mitteilungen

Nr. 121 (Mai 2003) - Nr. 126 (Dezember 2004)

Jedes Jahr werden drei Ausgaben mit Erscheinungstermin im Mai, September und Dezember publiziert.

Monitoring-Berichte

Verminderung der CO₂-Emissionen: Monitoring-Bericht 2000 - 2003; Beitrag der deutschen Zementindustrie; Siebte aktualisierte Erklärung zur Klimavorsorge 2002

Hrsg.: Verein Deutscher Zementwerke (VDZ). - Düsseldorf, 2005

Umweltdaten der deutschen Zementindustrie

Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2002

Hrsg.: Verein Deutscher Zementwerke (VDZ). - Düsseldorf, 2003 (als PDF im Internet abrufbar)

Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2003

Hrsg.: Verein Deutscher Zementwerke (VDZ). - Düsseldorf, 2004 (als PDF im Internet abrufbar)

Einzelveröffentlichungen

Naturschutz und Zementindustrie: Projektteil 2: Literaturstudie

Bundesverband der Deutschen Zementindustrie (BDZ); Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) (Hrsg.). - Düsseldorf: Verl. Bau+Technik, 2003; ISBN 3-7640-0423-1

Process Technology of Cement Manufacturing: VDZ Congress 2002

Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) (Hrsg.). - Düsseldorf: Verl. Bau+Technik, 2003; ISBN 3-7640-450-0

Einzelveröffentlichungen

- Basten, M.; Gardeik, H.O.; Loeckener, R.
Initiative for sustainability in the German cement industry - joint commitment to ecologically and socially compatible economic development
In: Cement International 1 (2003) 6, S. 44-53
- Berg, Wolfgang vom; Sybertz, Franz;
Härdtl, Reiner; Wiens, Udo
Flugasche im Betonbau: Vom Abfall zum Bauprodukt; Auch eine Schießl-Erfolgsstory
In: Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr. -Ing. Peter Schießl / Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung, TU München (Hrsg.). - München, 2003. - (TU München Centrum Baustoffe und Materialprüfung: Schriftenreihe Baustoffe; Feb 03), S. 221-230
- Bodendiek, N.; Hoenig, Volker
NO_x-Minderung durch gestufte Verbrennung in Vorcalcineranlagen der Zementindustrie
In: Verbrennung und Feuerungen - 21. Deutscher Flammentag: Tagung Cottbus, 9. und 10. September 2003 / Verein Deutscher Ingenieure (VDI); VDI-Gesellschaft Energietechnik (VDI-GET) (Hrsg.). - Düsseldorf: VDI-Verl., 2003. - (VDI-Berichte; 1750), S. 153-159
- Bodendiek, Nils; Hoenig, Volker
Studies of the operating behaviour of precalcining plants: Technical Field 3: Burning techniques
In: Process Technology of Cement Manufacturing: VDZ Congress 2002 / Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) (Hrsg.). - Düsseldorf: Verl. Bau+Technik, 2003, S. 216-220
- Boos, Peter; Thielen, Gerd;
Schmitt-Riegraf, Cornelia
Technische Grundsätze bei der Instandsetzung von Trinkwasserbehältern aus Beton: Teil 1; Teil 2
In: beton 53 (2003) 7-8, S. 399-404; 10, S. 513-516
- Eickschen, Eberhard
Einflüsse auf die Luftporenbildung in Straßenbeton: Teil 1; Teil 2
In: beton 53 (2003) 5, S. 265-270; 6, S. 321-326
- Feldrappe, Volkert; Müller, Christoph
Influence of silica fume on freeze-thaw resistance of high strength concrete
In: Proceedings of International Conference on Durability of HPC and Final Workshop of CONLIFE: University of Duisburg-Essen, IBPM; 23 - 24 September 2004; Essen, Germany / Ed. by. Setzer, M.J.; Palecki, S. - Freiburg: Aedificatio-Verl., 2004, S. 255-265
- Feldrappe, Volkert; Müller, Christoph
Auswirkungen einer Frostbeanspruchung auf dichte hochfeste Betone: Teil 1
In: beton 54 (2004) 10, S. 513-515
- Grube, Horst;
Kind-Barkauskas, Friedbert
Beschichtungen auf Beton: Technische Zusammenhänge, Anforderungen und Regelungen
In: Beton und Farbe / Kind-Barkauskas, Friedbert (Hrsg.). - Stuttgart: Dt. Verl.-Anstalt, 2003, S. 45-51
- Hoenig, Volker; Bodendiek, N.;
Hoppe, Helmut
NO_x abatement in the German Cement Industry
In: V Coloquios de directores y técnicos de fábricas de cemento 25 - 27 de febrero de 2003, Sevilla (España): Volumen I, Temas 1 y 3 / Cemento Hormigón; Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (OFICE-MEN); Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA). - o.O.: Ediciones Cemento, 2003, S. 129-142
- Hoenig, Volker; Müller-Pfeiffer, Michael
Contribution of a cement works to the air pollution situation in its vicinity: Technical Field 6: Sustainability and cement production
In: Process Technology of Cement Manufacturing: VDZ Congress 2002 / Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) (Hrsg.). - Düsseldorf: Verl. Bau+Technik, 2003, S. 493-498

- Hoening, Volker; Schneider, Martin
CO₂ reduction in the cement industry: Technical Field 6: Sustainability and cement production
 In: Process Technology of Cement Manufacturing: VDZ Congress 2002 / Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) (Hrsg.). - Düsseldorf: Verl. Bau+Technik, 2003, S. 499-505
- Hoening, Volker; Künne, P.
Operational experiences with refractories at precalciner cement plants
 In: 46th International colloquium on refractories: refractories for industrials; Aachen, 12 and 13 November 2003. - Düsseldorf: Stahleisen, 2003. - (Stahl und Eisen special), S. 49-52
- Kordts, Stefan; Breit, Wolfgang
Beurteilung der Frischbetoneigenschaften von selbstverdichtendem Beton
 In: beton 53 (2003) 11, S. 565-571
- Kordts, Stefan; Breit, Wolfgang
Controlling the workability properties of self-compacting concrete used as ready-mixed concrete
 In: 3rd International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete: Stockholm 17.-20.08.2003 / Wallevik, O.; Nielsson, I. (Hrsg.). - Bagneux: RILEM, 2003. - (RILEM Proceedings; PRO 33), S. 220-231
- Kordts, Stefan; Breit, Wolfgang
Kombiniertes Prüfverfahren zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit von SVB - Auslaufkegel
 In: beton 54 (2004) 4, S. 213-219
- Kordts, Stefan
Beton, der wie Honig fließt
 In: Konstruktionspraxis Automation, Antriebe, Maschinenelemente, Werkstoffe, CAD 34 (2004) 5, S. 6
- Lipus, Klaus; Puntke, Stefan
Sulfatwiderstand unterschiedlich zusammengesetzter Betone: Teil 1; Teil 2
 In: beton 53 (2003) 2, S. 97-100; 3, S. 153-157
- Locher, G.; Schneider, M.
Mathematical Modelling of the Cement Clinker Burning Process
 In: V Coloquios de directores y técnicos de fábricas de cemento 25 - 27 de febrero de 2003, Sevilla (España): Volumen II, Tema 2 / Cemento Hormigón; Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (OFICEMEN); Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA). - o.O.: Ediciones Cemento, 2003, S. 171-178
- Locher, Georg; Klein, Henning
Mathematical modelling of the cement clinker burning process: Technical Field 3: Burning techniques
 In: Process Technology of Cement Manufacturing: VDZ Congress 2002 / Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) (Hrsg.). - Düsseldorf: Verl. Bau+Technik, 2003, S. 259-263
- Locher, Georg; Schneider, Martin
Modelling in cement kiln operations
 In: Innovations in portland cement manufacturing / Bhatti, Javed I.; MacGregor Miller, F.; Kosmatka, Steven H. (Hrsg.). - Skokie, Ill.: Portland Cement Association (PCA), 2004. - (PCA; 2786a), S. 1275-1310
- Marchuk, V.; Thielen, G.
Rolle der Silikastaubreaktionen im Schwindverhalten des Zementsteins
 In: Ibausil: 15. Internationale Baustofftagung; 24. - 27. September 2003 Weimar Tagungsbericht; Band 1 / Hrsg.: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar; Stark, J. - Weimar, 2003, S. 1-1337 - 1-1347
- Müller, Christoph
Schutt und Asche: Beton als kreislaufgerechter Baustoff
 In: Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Peter Schießl / Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung, TU München (Hrsg.). - München, 2003. - (TU München Centrum Baustoffe und Materialprüfung: Schriftenreihe Baustoffe; Feb 03), S. 231-242
- Müller, Christoph
Betonwaren mit rezyklierten Gesteinskörnungen: Verwendungsmöglichkeiten bei der Betonwarenproduktion
 In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 70 (2004) 7, S. 10-21

- Müller, Christoph; Lang, Eberhard
Dauerhaftigkeit von Beton mit Portlandkalkstein- und Portlandkompositzementen CEM II-M (S-LL): Teil 1; Teil 2
In: *beton* 55 (2005) 3, S. 131-138; 4, S. 197-202
- Müller-Pfeiffer, Michael; Clemens, P.
Comparison of grinding systems for cement production and examination of the charge grading in downstream ball mills
In: *Cement International* 2 (2004) 2, S. 59-67
- Oerter, Martin
Effects of the use of secondary materials on emissions in clinker production: Technical Field 4: Use of secondary materials
In: *Process Technology of Cement Manufacturing: VDZ Congress 2002 / Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) (Hrsg.). - Düsseldorf: Verl. Bau+Technik, 2003, S. 368-371*
- Puntke, Stefan; Schäfer, Elke; Schneider, Martin
Characterisation of the reactivity of cement constituents: Technical Field 1: Influence of process technology on the manufacturing of market-oriented cements
In: *Process Technology of Cement Manufacturing: VDZ Congress 2002 / Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) (Hrsg.). - Düsseldorf: Verl. Bau+Technik, 2003, S. 63-68*
- Rickert, Jörg; Thielen, Gerd
Influence of long-term retarder on the hydration of clinker and cement
In: *Proceedings of the fib symposium 2004: Concrete structures: The challenge of creativity; April 26 - 28, 2004; Avignon, France / Fédération Internationale du Béton (fib); Comité Euro-International du Béton (CEB); Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP) (Hrsg.). - Avignon, 2004, S. 144-145*
- Schäfer, Stefan; Hoenig, Volker
Effects of process technology on the behaviour of mercury in the clinker burning process: Technical Field 6: Sustainability and cement production
In: *Process Technology of Cement Manufacturing: VDZ Congress 2002 / Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) (Hrsg.). - Düsseldorf: Verl. Bau+Technik, 2003, S. 484-488*
- Schneider, Martin; Spanka, Gerhard
Hygienic, health and environmental compatibility of cementitious construction products
In: *11th International Congress on the Chemistry of Cement: Cement's contribution to development in the 21st century; Durban 11.-16.05.2003 / Grieve, G.; Owens, G. (Hrsg.). - Halfway House: Cement and Concrete Institute, 2003, o.S.*
- Schneider, Martin; Puntke, Stefan; Schneider, Christian; Müller, Christoph
Use and reactivity of cement main constituents in Germany
In: *11th International Congress on the Chemistry of Cement: Cement's contribution to development in the 21st century; Durban 11.-16.05.2003 / Grieve, G.; Owens, G. (Hrsg.). - Halfway House: Cement and Concrete Institute, 2003, o.S.*
- Schneider, Martin; Puntke, Stefan; Sylla, Heinz-Martin; Lipus, Klaus
Sulfate-resisting properties of cements and cement/fly ash mixtures
In: *11th International Congress on the Chemistry of Cement: Cement's contribution to development in the 21st century; Durban 11.-16.05.2003 / Grieve, G.; Owens, G. (Hrsg.). - Halfway House: Cement and Concrete Institute, 2003, o.S.*
- Spanka, Gerhard
Fixation of Trace Elements and Organic Substances by Stabilization with Cement
In: *WASCON 2003: Proceedings of the fifth international conference on the environmental and technical implications of construction with alternative materials. San Sebastian, Spain 04.-06.06.2003 / Urbina, Gregorio Ortiz de; Goumans, J.J.J.M.; International Society for Construction with Alternative Materials (ISCOWA); INASMET Foundation (Hrsg.). - Nieuwegein, 2003, S. 721-730*

- Sprung, Siegbert
Interview with Dr.-Ing. Alessandro Buzzi, Chief Executive of BUZZI UNICEM and new President at CEMBUREAU
In: Cement International 2 (2004) 5, S. 33-37
- Sybertz, Franz
Zement
In: Anwendungsnormen zu harmonisierten Normen für Bauprodukte in Europa - Festlegungen für Bauwerke: Vortragsveranstaltung des Normenausschusses Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V. am 16. Oktober 2001 in Berlin/Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN (Hrsg.). - Berlin, 2003, S. 3-14
- Thielen, Gerd
Professor Dr.-Ing. Peter Schießl zur Vollendung seines 60. Lebensjahres
In: Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Peter Schießl / Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung, TU München (Hrsg.). - München, 2003. - (TU München Centrum Baustoffe und Materialprüfung: Schriftenreihe Baustoffe; Feb. 03), S. 5-19
- Thielen, Gerd; Korodts, Stefan; Spanka, Gerhard
Rheological and setting behavior of mortar and concrete
In: Concrete Structures in the 21st Century: Proceedings of the first fib Congress 2002; Volume 2: Condensed Papers (2) / Japan Prestressed Concrete Engineering Association; Japan Concrete Institute (Hrsg.). - [Osaka], 2002, S. 89-90
- Thielen, Gerd; Locher, Georg; Hauer, Bruno
Contribution of cement production and use to sustainable development
In: Role of Cement Science in Sustainable Development: Proceedings of the International Symposium dedicated to Professor Fred Glasser, University of Aberdeen, Scotland; Celebrating Concrete: People and Practice, Dundee 03.-04.09.2003 / Dhir, Ravindra K.; Newlands, Moray D.; Cseteny, Laszlo J. (Hrsg.). - London: Telford, 2003, S. 495-504
- Thielen, Gerd
Health, hygiene and environment: Assessment and verification in harmonized product standards
In: Construction: Environmental seminars; Brussel, Diamant Conference and Business Centre; 25 March 2004 / Hrsg. CEN. - Brüssel, 2004 (2004), o.S.
- Wassing, Walter
Reactions of aluminium - the „missing link“ between blastfurnace slag chemistry and the standard compressive strength of blastfurnace cement?
In: Cement International 1 (2003) 4, S. 49
- Wassing, Walter
Relationship between the chemical reactivity of granulated blastfurnace slags and the mortar standard compressive strength of the blastfurnace cements produced from them
In: Cement International 1 (2003) 5, S. 94-109
- Wolter, Albrecht; Locher, Georg; Geiseler, Jürgen
Blast furnace slag (BFS) as a raw materials substitute for clinker burning: Technical Field 4: Use of secondary materials
In: Process Technology of Cement Manufacturing: VDZ Congress 2002 / Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) (Hrsg.). - Düsseldorf: Verl. Bau+Technik, 2003, S. 361-367
- Tagungsberichte**
- VDZ
Cement Chemistry Technical Conference on Secondary Fuels: Duesseldorf, Germany; 10.04.2003
In: Cement International 1 (2003) 3, S.18-21

Verein Deutscher Zementwerke e.V.
Forschungsinstitut der Zementindustrie
Postfach 30 10 63
D-40410 Düsseldorf
Tannenstraße 2
D-40476 Düsseldorf