

## Tätigkeitsbericht

2005 – 2007



Verein Deutscher Zementwerke e.V.  
Forschungsinstitut der Zementindustrie



Verein Deutscher Zementwerke e.V.  
Forschungsinstitut der Zementindustrie  
Postfach 30 10 63, D-40410 Düsseldorf  
Tannenstraße 2, D-40476 Düsseldorf  
Telefon: +49 (0) 211 45 78-1  
Telefax: +49 (0) 211 45 78-296  
info@vdz-online.de  
www.vdz-online.de



Das Titelbild zeigt den Blick in die Grobmahlkammer einer Kugelmühle für die Rohmaterialaufbereitung in einem Zementwerk. Kugelmühlen sind in der Zementindustrie nach wie vor sehr weit verbreitet, dieses trifft insbesondere für die Zementmahlung zu. Der Mühlentyp zeichnet sich durch seine hohe Zuverlässigkeit und damit geringem Wartungsbedarf aus. Angesichts gesteigener Kosten für elektrische Energie, kommt der Optimierung von Kugelmühlen in jüngster Zeit besondere Bedeutung zu. Das Forschungsinstitut hat im Berichtszeitraum verschiedene Kugelmühlen untersucht und Potenziale für deren Optimierung aufgezeigt. In vielen Fällen konnte dadurch eine Verringerung des elektrischen Energieverbrauchs bzw. eine Steigerung des Durchsatzes erreicht werden.

## Inhalt

<b>4</b>	<b>Verein Deutscher Zementwerke e.V. Forschungsinstitut der Zementindustrie</b>
6	Gliederung
7	Vorstand
8	Der Verein Deutscher Zementwerke
8	Ausschüsse, Arbeitskreise und Kommissionen
13	Zusammenarbeit mit anderen Organisationen
15	Vermittlung der Erkenntnisse
16	Forschungsinstitut der Zementindustrie
19	Dienstleistungen
<b>22</b>	<b>I Verfahrenstechnik der Zementherstellung</b>
24	Energieverbrauch
26	Energiebedarf
28	Anlagenbetrieb
<b>42</b>	<b>II Umweltschutz bei der Zementherstellung</b>
44	Gesetzgebung
48	Klimaschutz
54	Umweltdaten
55	Minderung gas- und staubförmiger Emissionen
61	Schallschutz
<b>62</b>	<b>III Leistungsfähigkeit von Zement</b>
64	Chemisch-mineralogische Zusammensetzung
65	Reaktivität von Hüttensanden
68	Glasprodukte aus Prozessstäuben der Zementindustrie
71	Einfluss der Korngrößenverteilung von Zementhauptbestandteilen des Zements
73	Untersuchungen zur Hydratation von Zementklinkerphasen
77	Röntgenographische Quantifizierung von Hüttensand in Zement
80	Sulfatwiderstand
<b>82</b>	<b>IV Güteüberwachung und Qualitätssicherung von Zement</b>
84	Überwachungsgemeinschaft des VDZ
88	Qualitätssicherung
90	Normung
92	Prüfverfahren
94	Chromatreduzierung von Zementen
<b>98</b>	<b>V Betonausgangsstoffe, Betontechnologie und Betonbautechnik</b>
100	Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen
104	Zement und Zusatzmittel
112	Alkali-Kieselsäure-Reaktion
116	Dauerhaftigkeit
120	Sichtbeton
123	Selbstverdichtender Beton
124	Ultrahochfester Beton
126	Erdfeuchte Betone
126	Verkehrswegebau
129	Baulicher Brandschutz
130	Modellierung
133	Normung
138	Beratung und Gutachten
<b>140</b>	<b>VI Umweltverträglichkeit von Zement und Beton</b>
142	Umweltkriterien für zementgebundene Baustoffe
144	REACH
145	Europäische Bauproduktenrichtlinie
147	DIBT-Merkblatt „Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“
149	Zementgebundene Werkstoffe im Trinkwasserbereich
150	Nachhaltiges Bauen mit Beton
152	Mess- und Prüfverfahren
<b>154</b>	<b>VII Verantwortung für Mitarbeiter</b>
156	Arbeitssicherheit
158	VDZ-Weiterbildungswerk
<b>162</b>	<b>Veröffentlichungen</b>



**Tätigkeitsbericht 2005 – 2007**

## Verein Deutscher Zementwerke e.V. Forschungsinstitut der Zementindustrie

Traditionell fasst der Verein Deutscher Zementwerke in wiederkehrenden Abständen in seinem Tätigkeitsbericht seine Arbeit zusammen. Dieser Bericht bezieht sich auf den Zeitraum der Jahre 2005 bis 2007. Wie immer werden Themen der Zementherstellung und -anwendung dargestellt, mit denen sich das Forschungsinstitut der Zementindustrie im Rahmen der industriellen Gemeinschaftsforschung befasst hat.

Die Herausforderungen für die Zementforschung in Deutschland in den vergangenen zehn Jahren waren durch eine anhaltende Bau- rezession geprägt. Insofern haben der Rückgang des Zementversands und auch die zunehmende Internationalisierung der Zementhersteller sowie die Europäisierung von Normen und Umweltschutzvorschriften zu einer Erweiterung der Arbeitsbereiche und darüber hinaus zu einer Neuausrichtung des Forschungsinstituts geführt. So tritt das Institut mittlerweile zunehmend als Dienstleister rund um Zement und Beton auf. Gestützt auf die Ergebnisse erstklassiger Forschungsarbeiten und auf die Einbindung in die Industrie berät das Institut Zementproduzenten und -anwender in vielen aktuellen Fragen der Zement- und Betonherstellung. Eine umfangreiche und moderne technische Ausstattung sowie gut ausgebildete Mitarbeiter ermöglichen ein qualitativ hochwertiges Dienstleistungsangebot. In der Konsequenz der zunehmenden Tätigkeit als Auftragnehmer werden Teile des Instituts zukünftig als GmbH geführt.

Durch die Neuausrichtung des Instituts wird seine Expertise verstärkt auch auf europäischer und weltweiter Ebene in Anspruch genommen. Die hervorragende Vernetzung des Instituts in der internationalen Zementforschung und im europäischen Zementverband CEMBUREAU sowie die Zusammenarbeit mit den nationalen und internationalen Zementherstellern haben dazu geführt, dass das Institut als internationales Kompetenzzentrum für Zement und Beton anerkannt und in Anspruch genommen wird. Die Zusammenarbeit wird über die European Cement Research Academy (ecra) intensiviert, die der VDZ vor wenigen Jahren mitgegründet hat und die als Grundstein für eine europäische Forschungsplattform dient.

Im September 1957 konnte das Institutsgebäude in Düsseldorf seiner heutigen Bestimmung übergeben werden. Der Rückblick auf 50 Jahre Institutsgeschichte zeigt, dass der Verein Deutscher Zementwerke mit seinem Forschungsinstitut ein schlagkräftiges Instrument für die Gemeinschaftsarbeit hat. Insgesamt ist dadurch nach wie vor gewährleistet, dass der VDZ in seiner bewährten Form erhalten bleibt und seine satzungsgemäße Aufgabe auch zukünftig erfüllen kann. Insofern ist das Forschungsinstitut gut gerüstet für die Herausforderungen der kommenden Jahre.

Dr. Martin Schneider  
Hauptgeschäftsführer

Verein Deutscher Zementwerke e.V.  
Düsseldorf, im Mai 2007



# Verein Deutscher Zementwerke e.V.

Mitgliederversammlung

Techn.-Wiss.  
Beirat

Vorstand

Haushalts-  
beirat

Vorsitzende

Geschäftsführung

Arbeitsausschüsse

Beton-  
technik

Zement-  
chemie

Fachauschuss  
d. Überw.-Gem.

Umwelt u. Ver-  
fahrenstechnik

Rechts-  
fragen

**Forschungsinstitut der Zementindustrie**



## Vorstand

### Vorsitzender

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

### Stellvertretende Vorsitzende

Dipl.-Wirtsch.-Ing. W. Bauer, Wiesbaden

Dipl.-Kfm. A. Kern, Heidelberg

Dipl.-Ing. J. Albeck, Ulm

Prof. Dr. J. Blumbach, Harburg (bis 09.11.2006)

Dipl.-Ing. (MBA), G. Bourrain, Oberursel (ab 21.03.2006)

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

Dr. M. Bücker, Solnhofen

Dipl.-Ing. M. Edelmann, Rohrdorf

Dr.-Ing. K. Eichas, Sehnde (bis 27.09.2006)

Dipl.-Ing. F. Fleuret, Oberursel (ab 09.11.2006)

Lic. oec. K. Gernandt, Hamburg

Dipl.-Ing. B. Goedecke, Wiesbaden

C. Gregoire St. Marie, Oberursel (bis 09.11.2006)

Dipl.-Kfm. R. Körner, Wiesbaden

Dr.-Ing. G. Krogbeumker, Beckum

Dipl.-Bw. P. Laubenstein, Ulm

Dipl.-Kfm. P. Linten, Ennigerloh

Dipl.-Vw. W. Matthias, Erwitte

Dipl.-Kfm. W. Müller, Großenlüder (ab 29.09.2005)

Dipl.-Ing. R. Nobis, Leimen

J. S. Pfitzner, Oberursel

Dipl.-Vw. J. Ramcke, Üxheim-Ahütte

Dipl.-Kfm. E. Schleicher, Ulm

Dipl.-Ing. H. Seibel, Erwitte

Dipl.-Kfm. G. Seitz, Heidelberg

Dr. Dipl.-Ing. G. Smetana, Oberursel (bis 21.3.2006)

Dr. D. Spenner, Erwitte

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. K. Tausendpfund, Pommelsbrunn

G. Trube, Hamburg

R. Willimann, Dotternhausen

Dipl.-Inform. E. Wittmann, Ratingen (ab 27.09.2006)

## Hauptgeschäftsführer des VDZ und Leiter des Forschungsinstituts

Dr. Martin Schneider

## Forschungsinstitut der Zementindustrie GmbH

### Beiratsvorsitzender

Dr. Martin Schneider

### Geschäftsführer

Dr. Martin Oerter

## Technisch-Wissenschaftlicher Beirat

### Als Vorsitzende des VDZ

Dipl.-Wirtsch.-Ing. W. Bauer, Wiesbaden

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

Dipl.-Kfm. A. Kern, Heidelberg

### Obleute der Ausschüsse und Kommissionen

Dipl.-Chem. K. H. Bender, Sehnde (Fachausschuss der ÜG)

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

Dr.-Ing. N. Ehrlich, Düsseldorf

(Alkali-Kieselsäure-Reaktion, AKR)

Dr. A. Glitz, Heidelberg (Recht)

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

### VDZ

Dr. rer. nat. M. Schneider

## Haushaltsbeirat und Rechnungsprüfer

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

Dipl.-Kfm. K. Brüggem, Oberursel

Dr.-Ing. S. Fink, Wiesbaden

K. Gernandt, Hamburg

V. Janke, Ratingen (ab 07.03.2007)

Dipl.-Bw. S. Laube, Wiesbaden (RP)

Dipl.-Kfm. A. Spönnagel, Ulm (RP)

Dipl.-Inform. E. Wittmann, Ratingen (bis 07.3.2007)

## 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 Mitarbei-

Eröffnung der Mitgliederversammlung 2006 durch Herrn Dipl.-Wirtsch.-Ing. Gerhard Hirth, dem Vorstandsvorsitzenden des Vereins Deutscher Zementwerke



tern 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 24 deutsche Zementunternehmen mit 56 Zementwerken als ordentliche Mitglieder sowie 32 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 12. Mai 2005 in Baden-Baden und am 11. Mai 2006 in Düsseldorf statt. Zu den Aufgaben der Mitgliederversammlung gehört die Wahl des Vorsitzenden und seiner Stellvertreter (Engerer Vorstand) sowie der Vorstandsmitglieder, jeweils für eine dreijährige Amtszeit. Satzungsgemäß spiegelt die Zusammensetzung des Vorstands die Struktur der Zementindustrie hinsichtlich regionaler Verteilung, Betriebsgröße und bevorzugt hergestellter Zementarten wider. Die Wahl des amtierenden Vorstands fand am 12. Mai 2005 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. Der Hauptgeschäftsführer des VDZ ist von der Mitgliederversammlung als besonderer Vertreter im Sinne §30 des BGB bestellt.

### Ausschüsse, Arbeitskreise und Kommissionen ■

Dem Vorstand stehen beratend Beiräte zur Seite, und zwar einerseits der Technisch-Wissenschaftliche Beirat für die Koordinierung der Aufgaben der Ausschüsse sowie der Forschungsplanung, -durchführung und -auswertung und andererseits der Haushaltsbeirat für Fragen der Finanzierung des VDZ und seines Forschungsinstituts. Dem Technisch-Wissenschaftlichen Beirat gehören der Engere Vorstand, die Obmänner der VDZ-Ausschüsse und Kommissionen sowie die Geschäftsführung und die Leitung des Forschungsinstituts an. Die Mitglieder des Haushaltsbeirats werden vom Vorstand gewählt. Als geborenes Mitglied gehört ihm der Obmann des BDZ-Haushaltsausschusses an.

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

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



**Dr. Martin Schneider, der Hauptgeschäftsführer des Vereins Deutscher Zementwerke, eröffnet die Technisch-Wissenschaftliche Zementtagung 2005 in Nürnberg**

schaft des VDZ fungiert er ebenfalls als Beirat für die Produktzertifizierung (vgl. Kapitel IV). Der Beirat besteht aus mindestens fünf stimmberechtigten Mitgliedern der interessierten Kreise. Er wird mindestens einmal pro Jahr einberufen.

#### **Ausschuss Betontechnik**

*Arbeitskreise: Verkehrsbau, Zement und Zusatzmittel, Ad-hoc-Arbeitskreise und Arbeitsgruppen: Dauerhaftigkeit, Untersuchungen AKR, Sulfatwiderstand*

Der Ausschuss Betontechnik befasst sich mit aktuellen Fragen der Betonherstellung und -anwendung. Hierbei begleitet er die entsprechenden Forschungsarbeiten des Instituts vor dem Hintergrund einer sachgerechten, qualitätsbewussten und kostengünstigen Anwendung von Zement und Beton in der Praxis.

Die Beratungen im Ausschuss konzentrierten sich im Berichtszeitraum auf die Normung von Zement und Beton und die Verwendung von CEM II- und CEM III-Zementen im Betonbau. Darüber hinaus hat der Ausschuss die Normung und Anwendungsregeln für gemahlene Hüttensand als Betonzusatzstoff verfolgt. Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton sowie der Sulfatwiderstand und die Thaumasil-Bildung waren Schwerpunkte auf dem Gebiet der Dauerhaftigkeit von Mörtel und Beton. Darüber hinaus wurden Untersuchungen zur Rostbildung auf Stahlschalungen und die daraus resultierenden Verfärbungen an den Sichtflächen von Betonfertigteilen begleitet. In enger Zusammenarbeit mit dem Arbeitskreis Zement und Betonzusatzmittel verfolgte der Ausschuss das Ziel, die Wechselwirkung zwischen Zement und Zusatzmitteln weiter zu erforschen. Dieses geschah mit der Absicht, Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von Zusatzmitteln zu definieren, die der Baupraxis auch unter Berücksichtigung einer wirtschaftlichen Zementproduktion genügen. Darüber hinaus wurden im Ausschuss die Schwerpunktthemen Verkehrsflächen aus Beton, Umweltverträglichkeit von Zement und Beton sowie zu erwartende Umweltdeklarationen für zementgebundene Baustoffe diskutiert.

Im Berichtszeitraum kam der Normungsarbeit für Zemente mit besonderen Eigenschaften eine große Bedeutung zu. Für diese und weitere europäisch harmonisierte Produktnormen mussten Änderungen zur Betonnorm DIN 1045-2 erarbeitet werden. Dabei konnten die wesentlichen Ziele erreicht werden.

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. So konnte die BDZ/VDZ-Kommission „Rohstoffsicherung“ zu Beginn des Berichtszeitraums ihre Arbeit erfolgreich beenden. Die Kommission „Transportbeton“ wurde vom Vorstand im Herbst 2006 neu eingesetzt.

#### **Fachausschuss der Überwachungsgemeinschaft des VDZ**

Der Fachausschuss (früher Güteüberwachungsausschuss genannt) ist gemäß der Vereinssatzung das zuständige Organ für die Tätigkeiten als Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle (PÜZ-Stelle) der bauaufsichtlich anerkannten Überwachungsgemeinschaft des Vereins Deutscher Zementwerke. Er besteht derzeit aus acht Mitgliedern, die jeweils für eine Amtszeit von drei 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. Im Fachausschuss ist außerdem die Oberste Bauaufsichtsbehörde mit bis zu zwei von ihr benannten Mitgliedern vertreten. Der Fachausschuss tritt mindestens zweimal jährlich zusammen. Im Berichtszeitraum wurden insgesamt vier Sitzungen abgehalten.

Hauptaufgabe des Ausschusses ist die Beurteilung und abschließende Bewertung der Ergebnisse der durch die Überwachungsgemeinschaft des VDZ durchgeführten Zertifizierungen. Diese besteht aus der Überwachung, Beurteilung und Auswertung der werkseigenen Produktionskontrolle sowie der Durchführung von Fremdüberwachungsprüfungen an Zementproben.

Zahlreiche Themen, die sich aus der Überwachungspraxis ergaben, wurden behandelt und entsprechende Handlungsanleitungen erstellt. Unter anderem wurde auf die erforderlichen Nachweise bei der Anwendung von alternativen Prüfverfahren eingegangen, die im Werk zur Optimierung von Prüfabläufen eingesetzt werden. Die Verwendung von einheitlichen Sack- und Silokennzeichnungen, die Überwachung von Umschlagstellen, die Vorgehensweise bei Direktversand, die Maßnahmen bei Festigkeits- und Chloridüberschreitungen sowie die einheitliche Handhabung von Überwachungsregeln durch unterschiedliche Stellen wurden behandelt.

Der Fachausschuss hat im Berichtszeitraum abgeschlossene und bevorstehende Änderungen von Normen und Regelwerken begleitet. Hiervon waren insbesondere die Produkt-, Überwachungs- und Prüfnormen für Zement und andere Bindemittel betroffen. Der Fachausschuss hat gemeinsam mit dem Forschungsinstitut die Werke über die erforderlichen Umstellungen auf die neuen Regelwerke informiert und sie entsprechend dabei unterstützt. Zum Beispiel konnte der Fachausschuss wichtige Hilfestellung bei Fragen geben, die sich durch die Einführung der europäischen Chromatrichtlinie bei Handhabung, Überwachung und Prüfung von chromatreduzierten Zementen ergaben. Auch im Hinblick auf die Überwachung von Zementen und hydraulischen Bindemitteln im Straßenbau wurden die Werke mit Handlungsanleitungen unterstützt.

#### **Zertifizierungs-Beirat FIZ-Zert**

Der Zertifizierungs-Beirat fungiert als Lenkungs-gremium der 1998 eingerichteten Zertifizierungsstelle für Managementsysteme FIZ-Zert. Im Zusammenhang mit der 2002 durchgeführten privatrechtlichen Akkreditierung der Überwachungsgemein-

Die Europäische Produktnorm für gemahlene Hüttensand wurde im Berichtszeitraum veröffentlicht. Der Ausschuss Betontechnik hat die Diskussionen vor allem im Hinblick auf die deutschen Anwendungsregeln intensiv verfolgt und mitgestaltet. Zur Vorbereitung der Anwendungsregeln wurde gemeinsam mit dem Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. und dem FEHS – Institut für Baustoff-Forschung e.V. sowie weiteren Forschungsstellen ein Sachstandsbericht erstellt. Im Hinblick auf die Verwendung von Hüttensand als Hauptbestandteil im Zement ist die Broschüre zur Verwendung von CEM II-Zementen im Betonbau aus dem Jahre 1999 überarbeitet und um die Gruppe der CEM III-Zemente erweitert worden.

Für die Gewährleistung des Sulfatwiderstands von Beton wurde im Berichtszeitraum ein industriübergreifender Kompromiss erzielt, der auch zukünftig ein schadenfreies Bauen sicherstellt. Zur wissenschaftlichen Absicherung wurde ein Forschungsprogramm initiiert, an dem sich das Forschungsinstitut der Zementindustrie, die Bauhaus-Universität Weimar und die Technische Universität München beteiligten. Das Vorhaben wird von der Industrie als DAfStb-Forschungsvorhaben finanziert und vom Ausschuss Betontechnik eng begleitet.

In enger Zusammenarbeit mit der Kommission Alkali-Kieselsäure-Reaktion hat der Ausschuss die Überarbeitung der Richtlinie des DAfStb begleitet und Forschungsprojekte initiiert, die zur Aufklärung noch bestehender Fragen beitragen sollen. Hiervon ist insbesondere die Praxisrelevanz von Performanceprüfungen betroffen. Insgesamt verfolgt das Forschungsinstitut mit allen Beteiligten das Ziel, eine schädigende AKR im Beton zu vermeiden und dabei gleichzeitig weiterhin regionale Ressourcen nutzen zu können.

Der Arbeitskreis Zement und Betonzusatzmittel hat dazu beigetragen, dass Forschungsarbeiten initiiert wurden, die das Verständnis der Wechselwirkung zwischen Zement und Betonzusatzmitteln weiter verbessern konnten. Das Ziel der Arbeiten war es, entsprechende Einflussfaktoren herauszuarbeiten, auf deren Grundlage Anforderungen an die notwendige Leistungsfähigkeit von Zusatzmitteln im Zusammenspiel mit Zementen definiert werden können. Der Arbeitskreis begleitet im Auftrag des Ausschusses die Forschungen im Institut und arbeitet eng mit den Vertretern der Bauchemie zusammen.

Das Argumentationspapier zu CEM II- und CEM III-Zementen im Straßenbau wurde vom Arbeitskreis Verkehrsbau erstellt und durch eine Sammlung von Erfahrungen mit diesen Zementen im Straßenbau ergänzt. Darüber hinaus liegt eine vom Arbeitskreis erstellte Musterausschreibung für Betondecken in Bushaltebuchten vor, die den Kommunen als konkrete Planungs- bzw. Ausschreibungshilfe an die Hand gegeben werden kann.

#### **Ausschuss Zementchemie** *Arbeitskreise: Analytische Chemie, Leistungsfähigkeit von Zementbestandteilen, Ad-hoc-Arbeitsgruppe Bypassstaub*

Ein wesentlicher Teil der Ausschussarbeit war der Reaktivität von Zementbestandteilen gewidmet. Besonderes Augenmerk galt dabei dem Hüttensand, hier im Besonderen der Rolle des  $TiO_2$  und seines Einflusses auf die Hydratation. In enger Zusammenarbeit mit dem Ausschuss Betontechnik wurde die Entwicklung der Europäischen Hüttensandnorm begleitet und Untersuchungen an alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen durchgeführt. Ringversuche galten der Bestimmung der Hydratationswärme und der quantitativen Klinkeranalyse mittels Rietveld. Im Hinblick auf die europäische Chemikalienpolitik REACH und die Bewertung von so genannten gefährlichen Inhaltsstoffen hat der Ausschuss den Sachstand aus Sicht der Zementindustrie zusammengestellt und die entsprechenden Entwicklungen auf europäischer Ebene begleitet.

Die Europäische Prüfnorm prEN 196-10 „Prüfverfahren für Zement (Teil 10): Bestimmungen des Gehaltes an wasserlöslichem Chrom(VI) im Zement“ wurde im Herbst 2006 veröffentlicht. Für die Analyse wurde ein Oxidationsschritt vorgesehen, falls das Ergebnis der Chromatbestimmung durch reduzierende Stoffe wie Sulfide und Sulfite verfälscht werden kann. Da die Extraktion eines Mörtels zeit- und arbeitsaufwendig ist, wurde das Verfahren nach deutscher TRGS 613 ebenfalls in die Norm aufgenommen und darf z. B. in der werkeigenen Produktionskontrolle angewendet werden, auch wenn das Mörtelverfahren das Referenzverfahren darstellt. Bei der Bestimmung der wasserlöslichen Chromatgehalte in zementhaltigen Zubereitungen wurden vereinzelt Chromatgehalte von über 2 ppm (bezogen auf die Trockenmasse des Zements) ermittelt, obwohl der Zement nachweislich chromatreduziert war. Das Forschungsinstitut steht hierzu in Kontakt mit seinen Mitgliedsunterneh-

men und geht diesem Sachverhalt in einem Forschungsprojekt nach, das gemeinsam mit den Verbänden der Bauchemie und der Werk trockenmörtelhersteller durchgeführt wird.

Vorliegende Untersuchungsergebnisse zur Hüttensandreaktivität deuten an, dass  $TiO_2$  eine mögliche Ursache für eine hohe Hüttensandglasdichte sein kann. Eine hohe Glasdichte bedeutet quasi ein „Zusammenrücken“ der Glasbestandteile, dadurch können sich Kristallvorstufen bilden, die sich bei der Hydratation anders verhalten als die Bestandteile eines weniger dichten Glases.

Mit der analytischen Bestimmung des Hüttensandgehalts in Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen hat sich der Arbeitskreis Analytische Chemie befasst. Vor allen Dingen im Hinblick auf neue Zementarten (M-Zemente) wurden die bisherigen Bestimmungsverfahren neu bewertet. Danach führt das selektive Lösen zu belastbaren Ergebnissen. Während der Aufwand hierfür in der Fremdüberwachung vertretbar ist, ist er für die routinemäßige Eigenüberwachung jedoch i. d. R. zu hoch. Als Alternative bietet sich hier die Röntgendiffraktometrie in Verbindung mit der Rietveld-Verfeinerung an. Vor diesem Hintergrund ist ein Ringversuch zur Hüttensandgehaltbestimmung von zwei Hochofenzementen durchgeführt worden, in dem neben der Rietveld-Verfeinerung das selektive Lösen und auch die mikroskopische Hüttensandauszählung zur Anwendung kamen.

Ende 2005 haben die ersten Abstimmungen im Europäischen Parlament und im Europarat zur „Neuen Europäischen Chemikalienverordnung – REACH“ stattgefunden. Auch wenn danach Zementklinker nicht der Registrierungspflicht unterliegt, bringt die neue Chemikalienpolitik eine Vielzahl von Veränderungen für die Zementhersteller, ihre Lieferanten und Kunden mit sich. Der Ausschuss Zementchemie hat den Sachstand zusammengetragen und informiert sowohl die Zementhersteller als auch ihre Abnehmer über die zu erwartenden Änderungen.

Im Arbeitskreis Analytische Chemie wurde ein Vergleichsversuch zur quantitativen Metall- und Halbmetall-Spurenelementbestimmung in einer Zementprobe durchgeführt und ausgewertet. Weitere Vergleichsversuche zur Spurenelementanalyse sind geplant, Gleiches gilt für die quantitative Bestimmung von Erstarrungsreglern im Zement mittels Rietveld-Analyse sowie für die Bestimmung von Halogenen in

Abgasen und des biogenen Anteils in Sekundärbrennstoffen.

Der Arbeitskreis Leistungsfähigkeit von Zementbestandteilen hat sich mit der Reaktivität von Kalksteinmehl und Hüttensand als Hauptbestandteil im Zement befasst. Außerdem wurden Forschungsarbeiten zum Einfluss des Mahlsystems auf die Eigenschaften von Portlandzement und Hüttensandmehlen diskutiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Mühlenatmosphäre von maßgeblicher Bedeutung für die Eigenschaft von Hüttensandmehlen sein kann. Als weitere Themen hat der Arbeitskreis in Zusammenarbeit mit dem Ausschuss Bontotechnik Versuche zum Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Portlandkalksteinzementen begleitet sowie Ergebnisse aus Untersuchungen zur Wechselwirkung von Zement und Fließmitteln erörtert.

#### **Ausschuss Umwelt und Verfahrenstechnik**

*Arbeitskreise: Arbeitssicherheit, Feuerfeste Materialien, NO<sub>x</sub>-Minderung, Umweltverträgliche Abbauführung, Spurenelemente, Lehrgangsbeirat, sowie die Ad-hoc-Arbeitsgruppen BAT, Bypassstaub und Lehrbriefe*

Der Ausschuss hat sich im Berichtszeitraum mit aktuellen Fragen der thermischen und mechanischen Verfahrenstechnik befasst. Darüber hinaus standen Arbeiten des Instituts zur Emissionsminderung und umweltrechtliche Anforderungen an die Zementherstellung im Mittelpunkt der Ausschussarbeit. Nach wie vor gilt ein Augenmerk der Verwertung von sekundären Roh- und Brennstoffen. Darüber hinaus wurde auf die Auswirkung der Brennerführung auf den Ofenbetrieb und die Klinkereigenschaften eingegangen sowie die Stoffkreisläufe in den Drehofenanlagen erörtert. Die Arbeiten des Instituts zur Auswirkung der Mahlsysteme und der Mühlenatmosphären auf die Zementeigenschaften wurden intensiv begleitet und die entsprechenden Untersuchungen in den großtechnischen Mahlanlagen ausgewertet. Nach wie vor betreut der Ausschuss intensiv das Thema CO<sub>2</sub>-Emissionshandel und die hierzu erforderliche Berichterstattung.

Der Arbeitskreis Arbeitssicherheit hat die erfolgreiche Sicherheitsarbeit des Vereins Deutscher Zementwerke und seiner Mitgliedsunternehmen weiter voran getrieben. Im Berichtszeitraum stand die Ausarbeitung von Sicherheitsdatenblättern, die Erstellung einer Unterweisungsmatrix für Zementwerksmitarbeiter sowie die persön-

liche Schutzausrüstung beim Umgang mit Heißmehl im Vordergrund. Arbeitssicherheitsmanagementsysteme wurden intensiv diskutiert und Betriebsunfälle in den Unternehmen ausgewertet. Zukünftig wird sich der Arbeitskreis mit der Umsetzung der neuen Gefahrstoffverordnung befassen und das Merkblatt „Sicheres Arbeiten beim Umgang mit Heißmehl“ überarbeiten.

Der Arbeitskreis Feuerfeste Materialien hat die Arbeiten an einem Merkblatt fortgesetzt und hierfür einen umfangreichen Sachstand erarbeitet. Hierzu gehören Anforderungen an eine Zustandsdiagnose für Feuerfest-Materialien oder auch Ursachen für Schäden hieran. Das Thema Arbeitssicherheit wird ebenso behandelt wie Trocknungs- und Aufheizprozeduren nach einer Neuzustellung.

Der Arbeitskreis Umweltverträgliche Abbauführung hat seine Arbeiten zur Erstellung eines Leitfadens nahezu abgeschlossen. Zu den Themenschwerpunkten gehören die rechtlichen Grundlagen, darüber hinaus der eigentliche Abbau, der Transport des Materials und die Vorzerkleinerung. Bohren und Sprengen sowie mechanische Verfahren werden behandelt, darüber hinaus wird auf die Wasserhaltung, die Abbauplanung und die Qualitätssteuerung zur Rekultivierung und Renaturierung eingegangen. Der Leitfaden stellt eine Entscheidungshilfe und Argumentationslinie für Zementwerksbetreiber dar, vor allen Dingen um verschiedene Abbautechniken gegeneinander abzuwägen und auszuwählen.

Die NO<sub>x</sub>-Minderung am Drehofen der Zementindustrie wird seit vielen Jahren im Arbeitskreis NO<sub>x</sub>-Minderung begleitet. Die Forschungsarbeiten des Instituts gemeinsam mit den Mitgliedsunternehmen haben dazu geführt, dass die NO<sub>x</sub>-Emissionen in der Zementindustrie in den vergangenen Jahren deutlich reduziert werden konnten. Der Arbeitskreis hat sich mit der Optimierung des SNCR-Verfahrens befasst und dabei auch eine verbesserte Ausnutzung des Reduktionsmittels Ammoniakwasser untersucht. Die Ergebnisse fließen in die Arbeit der Ad-hoc-Gruppe BAT (Best Available Technique) ein, die die Revision des BAT-Merkblatts für die Zement- und Kalkindustrie begleitet. Hierbei spielen nicht nur die theoretischen Minderungspotenziale sondern auch die Kosten eine entscheidende Rolle.

Die Arbeitsgruppe BAT hat sich intensiv mit der Überarbeitung des BAT-Dokuments für die Zement- und Kalkindustrie befasst.

Hierbei ging es um Fragen des Energieverbrauchs für den Klinkerbrennprozess und Anforderungen an den Abfalleinsatz in Drehofenanlagen der Zementindustrie. Bei der Frage der NO<sub>x</sub>-Minderungspotenziale hat die Arbeitsgruppe sehr eng mit dem Arbeitskreis NO<sub>x</sub>-Minderung zusammengearbeitet.

Die Ad-hoc-Arbeitsgruppe Bypassstaub hat ihre Arbeiten mit der Erstellung der unterschiedlichen Massenbilanzen fortgesetzt und betriebliche Maßnahmen zur Vergleichmäßigung des Bypassstaub-Anfalls erörtert. Darüber hinaus haben sich die Mitglieder des Arbeitskreises intensiv mit möglichen Verwertungswegen von Bypassstaub anhand von verschiedenen Beispielen beschäftigt. Abgerundet wurden die Arbeiten durch die Erstellung eines Sicherheitsdatenblatts für Bypassstaub.

Der Lehrgangsbeirat hat mit der Arbeitsgruppe Lehrbriefe weitere Lehrbriefe erstellt. Für 47 Themen dienen diese als Schulungsunterlage für die betriebsinterne Weiterbildung von Produktionsmitarbeitern.

#### **Rechtsausschuss**

Der Rechtsausschuss ist eine Gemeinschaftseinrichtung von VDZ und BDZ. Zu seinen Themen gehören alle Rechtsfragen rund um die Herstellung von Zement, einschließlich des Umwelt-, Unternehmens- und Wettbewerbsrechts.

Wie bereits in den Jahren zuvor war der Emissionshandel wieder eines der herausragenden Themen, mit denen sich der Ausschuss zu befassen hatte. Diskutiert wurden unter anderem die rechtlichen Aspekte einer Übertragung der Emissionsrechte von stillgelegten Anlagen auf Bestandsanlagen, die so genannten „Monitoring Guidelines“, die Emissionsberichterstattung und die Härtefallregelung nach § 7 ZuG.

Ein weiteres Sitzungsthema war die Frage, inwieweit Behörden oder private Dritte die Herausgabe von Genehmigungen und Umweltdaten von den Genehmigungsbehörden verlangen können. Der Ausschuss hat hierzu konkrete Handlungsempfehlungen für die Mitglieder verabschiedet, in der er auch auf die Veröffentlichung von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen eingeht.

Nach dem am 13.07.2005 in Kraft getretenen neuen Energiewirtschaftsgesetz sind die Netzbetreiber verpflichtet, Netzbverbrauchern mit atypischer Netznutzung, zu denen auch die Zementindustrie zählt, ein individuelles Netzentgelt anzubieten. Die

Durchsetzung dieser Vorschrift ist in der Praxis allerdings mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Der Ausschuss hat daher verschiedene Möglichkeiten diskutiert und Empfehlungen abgegeben, um Regulierungsbehörden und Netzbetreiber zu einer Mitwirkung zu bewegen.

Darüber hinaus hat der Ausschuss zahlreiche Gesetzesvorhaben begleitet und deren Auswirkungen erörtert.

### **VDZ/BDZ-Kommission Umweltverträgliche Verwertung von Sekundärstoffen**

Die Kommission hat sich intensiv mit der Entwicklung des Sekundärbrennstoffeinsatzes in der Zementindustrie befasst. Ferner wurden die Bestimmung des biogenen Anteils in Ersatzbrennstoffen und Vorschläge für eine ökobilanzielle Bewertung der Abfälle erörtert.

Durch das seit Sommer 2005 geltende, weit reichende Deponierungsverbot für nicht aufbereitete Siedlungsabfälle haben sich die verfügbaren Abfallmengen und Stoffströme verändert. In diesem Zusammenhang hat die Kommission die Arbeiten des Umweltbundesamts begleitet, mit denen zukünftige Verwertungskapazitäten für Abfälle in industriellen Anlagen ermittelt wurden. Die Kommission hat die Anforderungen der Zementindustrie an die Qualität der am Markt verfügbaren Ersatzbrennstoffe bekräftigt. Dadurch wird auch weiterhin eine umweltverträgliche Verwertung in Drehofenanlagen der Zementindustrie möglich sein; es ist davon auszugehen, dass der bisherige Substitutionsgrad von etwa 50 Prozent in den kommenden Jahren weiter ausgebaut wird. Die Kommission befasste sich weiterhin mit der Bewertung bzw. der Bestimmung des biogenen Anteils von Ersatzbrennstoffen, dem durch den Emissionshandel eine zunehmende Bedeutung zugekommen ist. Für die CO<sub>2</sub>-Berichterstattung im Jahr 2005 wurde der biogene Anteil überwiegend durch selektiven Aufschluss bestimmt. Hier ergibt sich jedoch weiterer Handlungsbedarf, da sich das Bestimmungsverfahren zunächst nur auf einen Normenentwurf bezieht und darüber hinaus einzelne Laboratorien erhebliche Schwierigkeiten hatten, diesen korrekt umzusetzen. Insofern sieht die Kommission weiteren Handlungsbedarf für eine Vereinheitlichung der Prüfmethode. Dabei soll auch untersucht werden, inwiefern der Nachweis von biogenem Kohlenstoff durch die <sup>14</sup>C-Methode zu richtigen Ergebnissen führt.

Die ursprüngliche Aufgabe der Kommission war es, den umweltverträglichen Einsatz von Sekundärstoffen in der Zementindustrie vorzubereiten und sicherzustellen. Die Arbeiten der Kommission in den vergangenen Jahren haben dazu geführt, dass der Sekundärstoffeinsatz in der deutschen Zementindustrie anerkannt ist und keine negativen Auswirkungen auf die Emissionen und die Produktqualität hat. Darüber hinaus leistet die Zementindustrie mit der Verwertung von Abfällen einen Beitrag zur Entsorgungssicherheit. Zusammenfassend hat die Kommission ihre Arbeiten abgeschlossen und wurde vom Vorstand im Herbst 2006 aufgelöst.

### **VDZ-Kommission Alkali- Kieselsäure-Reaktion**

In enger Abstimmung mit dem Ausschuss Betontechnik hat sich die Kommission im Berichtszeitraum mit der Überarbeitung der Alkalirichtlinie und den „Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau“ befasst. Ziel der Arbeit ist es nach wie vor, zukünftig Schäden insbesondere an Betonfahrbahndecken aufgrund einer schädigenden AKR zu vermeiden.

An bestehenden Betonstraßen, die vor Inkrafttreten der o. g. Regelungen gebaut wurden, sind auch im Berichtsjahr Schäden aufgetreten. Die Ursachen hierfür wurden in der Kommission ausführlich diskutiert. Schwerpunkte waren dabei der Einfluss dynamischer Lasten durch den Verkehr, die in der Vergangenheit zugenommen haben. Darüber hinaus wurde der Einfluss der Alkali-Zufuhr von außen durch Taumittel, durch die Deckendicken und die Qualität des tragenden Untergrunds erörtert. Nach wie vor kommt der Qualität der Ausführung und hier insbesondere der Nachbehandlung im Betonstraßenbau herausragende Bedeutung zu.

Die Kommission hat sich in besonderem Maße dafür eingesetzt, dass auch zukünftig der pauschale Ausschluss von Gesteinskörnungen oder eine pauschale Begrenzung des Alkali-Gehalts in Zementen nicht zum Tragen kommt. Es wird vielmehr darauf ankommen, einfache und flexible Lösungen zu erarbeiten. Hierbei kommt hüttensandhaltigen Zementen eine besondere Bedeutung zu. Die Kommission hat entsprechende Forschungsvorhaben des Instituts hierzu begleitet. Weitere Forschungsvorhaben zielen auf den positiven Einfluss von Flugasche zur Vermeidung einer schädigenden AKR ab. Besondere Aufmerksamkeit widmet die Kommission darüber hinaus den praxisnahen Perfor-

mance-Prüfungen, mit denen das Ausmaß einer AKR im Beton frühzeitig und sicher erkannt werden kann.

### **VDZ/BDZ-Kommission Emissionshandel**

Schwerpunktmäßig begleitet die Kommission Emissionshandel die Umsetzung des nationalen Allokationsplans für die zweite Handelsperiode 2008 bis 2012. Darüber hinaus haben auch die Diskussionen über die Post-Kyoto-Ära begonnen. Neben den bekannten klassischen Minderungsmöglichkeiten im Hinblick auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Zementindustrie wird zunehmend das Thema CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Lagerung diskutiert. Entsprechende Forschungsvorhaben werden derzeit auf europäischer Ebene vor allen Dingen im Kraftwerksbereich durchgeführt. Die Kommission hat sich hierzu mit der Frage befasst, in welchem Maße diese Minderungstechniken auch für die Zementindustrie von Bedeutung sein können.

Aus Sicht aller energieintensiven Industrien ist es nach wie vor unbefriedigend, dass im Emissionshandelssystem keinerlei Möglichkeit für ein Produktionswachstum vorgesehen sein wird. Während in der ersten Handelsperiode eine angemessene Benchmark-Regel zur Verfügung stand, sollen in Zukunft nachträgliche Ex-Post-Anpassungen dieser Art nicht mehr möglich sein. In der Konsequenz kann es daher bei zunehmender Zementnachfrage dazu führen, dass die Zementhersteller ihre Kapazitäten nicht entsprechend der Marktnachfrage ausnutzen. Auf die Gefahr, dass es hier zu Verlagerungen der Zementproduktion in Regionen führt, die nicht dem Emissionshandel unterliegen, hat die Kommission erneut hingewiesen und mit entsprechenden Marktdaten untermauert.

Über das Musterklageverfahren gegen Gebührenbescheide wurde die Kommission informiert, gleiches gilt für die Emissionsberichterstattung und Verifizierung.

Die Selbstverpflichtung der Zementindustrie hat nach wie vor Bestand. Hierzu hat das Forschungsinstitut in Abstimmung mit der Kommission erneut die Brennstoff- und Produktionsdaten der Zementunternehmen abgefragt und zusammengestellt. Die Daten wurden wie in den vergangenen Berichtszeiträumen an das Rheinisch-Westfälische Institut für Wirtschaftsforschung übergeben, das hieraus einen offiziellen Bericht zur Vorlage bei der Bundesregierung veröffentlicht.

### VDZ-Kommission Transportbeton

Im Nachgang zur Mitgliederversammlung 2006 in Düsseldorf hat sich im VDZ eine Arbeitsgruppe Transportbeton zusammengefunden, aus der der Vorstand im Herbst 2006 die Kommission Transportbeton gegründet hat. Ziel der anstehenden Arbeiten ist es, die Koordination der Zementhersteller in Fragen der Normung und Qualität der Betonbauweise sicherzustellen. In der Kommission sind Mitglieder aus nahezu allen Zementunternehmen vertreten, die auch Transportbeton herstellen.

In den ersten Sitzungen wurde über die aktuelle Entwicklung der Normung und Anwendung von Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff berichtet. Zukünftig kommt der Revision der europäischen Betonnormung besondere Bedeutung zu. In diesem Zusammenhang wird sich der Arbeitskreis auch einen Überblick über Merkmale der Transportbetonherstellung im europäischen Ausland verschaffen.

### Zusammenarbeit mit anderen Organisationen ■

Der VDZ und sein Forschungsinstitut arbeiten auf zahlreichen Gebieten mit Behörden, Hochschulen, Materialprüfämtern und einer Reihe von Fachverbänden, Normenausschüssen sowie Organisationen verwandter Industrien auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene eng zusammen. Meist erfolgt diese Zusammenarbeit im Rahmen einer Mitgliedschaft von Mitarbeitern des Instituts oder von Mitgliedsunternehmen in den Gremien dieser Organisationen. Auch im Berichtszeitraum hat diese Zusammenarbeit in vielen Fragen zu sehr guten Ergebnissen geführt.

#### Bundesverband der Deutschen Zementindustrie

Der Bundesverband der Deutschen Zementindustrie (BDZ) ist der wirtschaftspolitische Zusammenschluss der deutschen Zementhersteller. Er ist die Nachfolgeorganisation der 1911 aus dem „Verein Deutscher Cement-Fabrikanten“ hervorgegangenen „Centralstelle zur Förderung der Deutschen Portland-Cementindustrie“.

Der BDZ vertritt 16 Zement produzierende Unternehmen bzw. Unternehmensgruppen mit 46 Zementwerken. Ein Aufgabenschwerpunkt des Verbands besteht in der Wahrnehmung der wirtschaftspolitischen Interessen seiner Mitglieder gegenüber Politik, Wirtschaft und Öffentlichkeit in der Bundesrepublik Deutschland.

Auf internationaler Ebene ist der BDZ Mitglied im CEMBUREAU, der Vereinigung der europäischen Zementhersteller. Auf nationaler Ebene wirkt er im Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden sowie im Bundesverband der Deutschen Industrie mit.

Mit der Abteilung Betoninformationen hat der BDZ im Berichtszeitraum überregionale Aufgaben der ehemaligen Bauberatung Zement wahrgenommen. Er arbeitet dabei sehr eng mit den regional operierenden Gesellschaften für Bauberatung und Marktförderung zusammen.

Zur Bündelung ihrer Marketingaktivitäten haben der BDZ, der Bundesverband Deutsche Beton- und Fertigteilindustrie und der Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie die BetonMarketing Deutschland GmbH gegründet.

Zwei Tochtergesellschaften des BDZ, das InformationsZentrum Beton (IZB) und der Verlag Bau+Technik, nehmen Teilbereiche der Gemeinschaftsaufgabe zur Imageförderung des Baustoffs Beton wahr.

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

Die AiF, zu deren Gründungsmitgliedern der VDZ gehört, fördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft die industrielle Gemeinschaftsforschung, insbesondere die der mittelständischen Industrie. Voraussetzung für die Förderung ist unter anderem, dass die Forschungsvereinigungen zusätzlich zur jeweiligen Fördersumme Eigenmittel in gleicher Höhe zur Verfügung stellen.

In den vergangenen Jahren erhielt der VDZ abermals Fördermittel der AiF für mehrere große Forschungsvorhaben. Hierfür sei der AiF und dem Bundeswirtschaftsministerium auch an dieser Stelle gedankt.

Der VDZ ist durch den Hauptgeschäftsführer im wissenschaftlichen Rat der AiF und durch mehrere Mitarbeiter in verschiedenen Gutachterausschüssen vertreten.

#### Zementherstellung und Umweltschutz

Im Bereich der Zementherstellung wie auch des Umweltschutzes besteht ein enger fachlicher Kontakt mit dem Bundesverband der Deutschen Industrie und dem Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden. Darüber hinaus arbeitet der VDZ aufgrund der breiten Palette seiner fachlichen Tätigkeitsfelder mit einer Reihe

anderer Organisationen zusammen. Hierzu zählen der Verein Deutscher Ingenieure (VDI), die Deutsche Vereinigung für Verbrennungsforschung (DVV), die Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber (VGB PowerTech), der Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh), das FEhS – Institut für Baustoff-Forschung, die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (ATV-DVWK) und die Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfachs (DVGW). Die Zusammenarbeit mit dem Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie und dessen Forschungsgemeinschaft betrifft vor allem die gemeinschaftlich betriebene Aus- und Weiterbildung der Industriemeister der Fachrichtung Kalk und Zement, die vielfältigen Tätigkeiten auf den Gebieten des Umwelt- und Gesundheitsschutzes sowie der Arbeitssicherheit. Mit vielen Ministerien der Bundesländer und des Bundes steht der VDZ in Fragen des umweltverträglichen Einsatzes von Sekundärstoffen und der CO<sub>2</sub>-Minderung bzw. des Handels mit Emissionszertifikaten in regem Austausch. Vertreter des VDZ sind darüber hinaus aktiv in verschiedenen Gremien des Deutschen Instituts für Normung (DIN). Hier sind in erster Linie die Normenausschüsse Bau (NABau), Wasser (NAW) sowie Grundlagen des Umweltschutzes (NAGUS) zu nennen. Sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene kooperiert der VDZ sehr eng mit der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen.

#### Zementanwendung

Der VDZ ist im Vorstand und in den Lenkungsgruppen des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) sowie im Beirat und in verschiedenen Arbeitsausschüssen der Normenausschüsse Bauwesen, in Gremien des Normenausschusses Materialprüfung sowie in der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) vertreten. Daneben gehören Mitarbeiter des Forschungsinstituts verschiedenen Gremien und Sachverständigenausschüssen des Instituts für Bautechnik an. Die Mitarbeit in den externen Gremien erstreckt sich insbesondere auf die Beratung, Koordinierung und Beurteilung von Forschungsvorhaben, auf die Ausarbeitung von Normen, Richtlinien und Merkblättern sowie auf die Beratung zur Erteilung bauaufsichtlicher Zulassungen.

Traditionsgemäß besteht eine enge und vertrauensvolle Zusammenarbeit mit den technisch-wissenschaftlichen Vereinen und Verbänden der Zementverbraucher, insbesondere mit dem Deutschen Beton- und Bautechnik Verein (DBV), dem Bundes-

verband der Deutschen Transportbetonindustrie (BTB) sowie dem Bundesverband Deutsche Beton- und Fertigteilindustrie (BDB). Zudem erfolgt ein enger fachlicher Austausch mit den Herstellern und Erzeugern weiterer Ausgangsstoffe für zementgebundene Baustoffe, wie der Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber (VGB PowerTec), der Deutschen Bauchemie sowie dem Bundesverband der Deutschen Kies- und Sandindustrie.

Für Anwendungen zementgebundener Baustoffe im Bereich Trinkwasserversorgung und Abwasserentsorgung bestehen fachliche Kontakte mit der Deutschen Vereinigung des Gas- und Wasserfachs (DVGW), dem DIN-Normenausschuss Wasser (NAW) sowie der Abwassertechnischen Vereinigung (ATV). Enge fachliche Kontakte bestehen auch zum Verband Deutscher Betoningenieure (VDB). Schon seit vielen Jahren werden in einem Kontaktausschuss mit dem Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie (BTB) die Fragen der Anwendung von Zementen in Transportbeton beraten und zu übergeordneten Fragestellungen eine gemeinsame Basis gesucht. Bereits im Jahr 1990 wurde der Koordinierungsausschuss Betonzusatzmittel mit dem Deutschen Bauchemie e. V. gegründet und im Jahr 2000 wurde ein Kontaktarbeitskreis mit der Kies- und Sandindustrie ins Leben gerufen.

### Gemeinschaftskreis Beton

Der Gemeinschaftsarbeitskreis Beton (GAK) sieht eine seiner Hauptaufgaben in der Vorbereitung gemeinsamer Initiativen im Bereich der Normung – mit dem strategischen Ziel, die Betonbauweise zu fördern. Im Gemeinschaftsarbeitskreis sind der Bundesverband der deutschen Transportbetonindustrie (BTB), der deutsche Beton- und Bautechnikverein (DBV) und der Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) vertreten. Die Leitung des GAK wechselt jährlich und lag im Berichtszeitraum bei VDZ und BTB.

Im Berichtszeitraum wurden gemeinsam initiierte Forschungsprojekte zum Beispiel zu den Themen Sichtbeton und Sulfatwiderstand von den Verbänden – z. T. unterstützt durch öffentliche Geldgeber – finanziert und eingehend begleitet. Im Bereich Normung galt es zu einer Reihe von Auslegungsanfragen zu den neuen Betonnormen Stellung zu nehmen.

In den kommenden Jahren wird der GAK insbesondere weitere Normungsaktivitäten auf europäischer Ebene zu verfolgen haben. Hierzu gehörten die anstehende

Überarbeitung der Betonnorm EN 206-1 durch das CEN TC 104/SC1 ab dem Jahr 2010 und die Arbeiten des CEN TC 351 „Bewertung der Freisetzung gefährlicher Stoffe aus Bauprodukten“.

### Koordinierungsausschuss VDZ/ Deutsche Bauchemie

Der Koordinierungsausschuss, dem Fachleute aus der Zement- und Zusatzmittelinindustrie angehören, wird zurzeit vom Verein Deutscher Zementwerke geleitet. Die Obmannschaft wechselt jährlich.

Der Ausschuss befasste sich ausführlich mit Fragen zum Zusammenwirken von Zement und Betonzusatzmitteln. Im Vordergrund standen die Wirkungsweise von natürlichen und synthetischen Luftporenbildnern sowie die Wechselwirkungen zwischen Luftporenbildnern und Fließmitteln auf der Basis von Polycarboxylatether (PCE).

Im Berichtszeitraum wurde im Rahmen einer Projektgruppe Nachbehandlungsmittel eingehend über die Wirksamkeit und die Bestimmung des Sperrfaktors von Nachbehandlungsmitteln diskutiert.

Vor dem Hintergrund der zum Teil vielfältigen Wechselwirkungen zwischen Zementen und Zusatzmitteln ist geplant, eine Projektgruppe Schnittstellenfragen einzurichten. In dieser Gruppe sollen zement- und zusatzmittelseitige Parameter herausgearbeitet und diskutiert werden, die für das robuste Zusammenwirken von Zementen und Zusatzmitteln in Bauprodukten von Bedeutung sind.

### 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 Hochschulinstituten 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 26 nationale Zementverbände länderübergreifend zusammen arbeiten. Der VDZ bringt sich seit vielen Jahren mit seiner technisch-wissenschaftlichen Expertise in diese Gemeinschaftsarbeit ein. Im Berichtszeitraum standen in besonde-

rem Maße Themen des Umweltschutzes und der CO<sub>2</sub>-Minderung im Vordergrund. So stellt der europaweite Handel mit Emissionszertifikaten seit 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. Der Mandatsentwurf der Kommission, der auf mögliche umweltrelevante Freisetzen aus Baustoffen abzielt, hat zu umfangreichen Forschungsarbeiten und einem intensiven Austausch auf europäischer Ebene geführt. Im Berichtszeitraum wurde die Mitarbeit des VDZ in den Spiegelgruppen zum TC 343 aufgenommen. Hier sollen Qualitätsstandards für aufbereitete Ersatzbrennstoffe aus nicht überwachungsbedürftigen Abfällen erarbeitet werden.

Mitarbeiter des FIZ waren an den Arbeiten der verschiedenen CEN/TC-Gruppen beteiligt. Der europäische Dachverband der Baustoffhersteller (CEPMC) ist auch für die Zementindustrie eine wichtige Plattform, um europäische Entwicklungen frühzeitig erkennen zu können. 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 Partnerorganisationen. 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. Hierzu gehören die befreundeten Verbände der Zementindustrie und ihre technisch-wissenschaftlichen Organisationen im nahen europäischen Ausland. Die Zusammenarbeit erfolgt auf vielfältige Weise, insbesondere in den Gremien der Europäischen Normungsorganisation CEN und des europäischen Zementverbands CEMBUREAU. Auch wurde im Jahr 2006 mit dem ungarischen Zementforschungsinstitut CEMKUT die Grundlage für eine langfristige Zusammenarbeit geschaffen. Darüber hinaus unterhält der VDZ gute Kontakte mit dem indischen National Council for Cement and Building Materials (NCB), der China Building Materials Industry Association (CBMIA) und dem koreanischen Zementverband (KCIA). Mit der US-amerikanischen Portland Cement Association (PCA) wurden im Berichtszeitraum gemeinsame Forschungsarbeiten initiiert bzw. durchgeführt. Der darüber hinausgehende Erfahrungsaustausch erfolgte auf dem Gebiet des Betonstraßenbaus sowie Themen der Zementanwendung und des Umweltschutzes.

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 zu vielen Forschungseinrichtungen weltweit.

### European Cement Research Academy (ecra)

Die European Cement Research Academy kann auch in ihrem vierten Jahr auf eine erfolgreiche Arbeit zurückblicken. Der VDZ hatte seinerzeit die Initiative für diese europäische Forschungsplattform ergriffen, in der heute mehr als 38 Mitglieder von Zementherstellern und Zementverbänden mitarbeiten. Während Workshops, die ecra anbietet, in erster Linie im Düsseldorfer Forschungsinstitut abgehalten werden, finden die Seminare meist in einem europäischen Zementwerk statt. Im Vordergrund stehen Fragen der Zementherstellung und der Zementanwendung, eine Besichtigung des jeweiligen Zementwerks rundet die Veranstaltungen ab.

Durch die ecra gelingt es zunehmend, technisch-wissenschaftliche Gemeinschaftsarbeit auf eine breitere Basis zu stellen. Erstmals ist angedacht, einzelne Forschungsthemen auch durch Mitglieder der ecra zu begleiten und zu finanzieren. Im Vordergrund steht derzeit die Bestimmung der Biomasse in Brennstoffen unter Einsatz der <sup>14</sup>C-Methode. Darüber hinaus soll ein Sachstandsbericht zu den Potenzialen der CO<sub>2</sub>-Abscheidung in Abgasen von Drehofenanlagen erarbeitet werden. Im kommenden Jahr ist erneut eine internationale Konferenz vorgesehen, die im Herbst 2008 in Prag stattfinden wird.

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, HeidelbergCement, Italcementi, Schwenk und Titan Cement.

### Vermittlung der Erkenntnisse ■

Die zahlreichen Arbeitsergebnisse der Ausschüsse, Arbeitskreise und Kommissionen sowie der Forschungstätigkeit des Instituts werden sowohl den Mitgliedern als auch der interessierten Fachwelt in zahlreichen Veröffentlichungen, Kollo-

quien, Seminaren, Vortragsveranstaltungen und Tagungen zugänglich gemacht. Diese Publikationen werden dabei überwiegend in elektronischer Form auf den Internet-Seiten des VDZ zur Verfügung gestellt. Ferner können sie über die VDZ-Seiten oder den gemeinsam mit dem BDZ und der BetonMarketing Deutschland GmbH im Internet betriebenen Beton-Shop unter [www.bdz-vdz.betonshop.de](http://www.bdz-vdz.betonshop.de) online bestellt werden.

### Veröffentlichungen

Neuere Erkenntnis in der Verfahrenstechnik, der Zementherstellung und vor allem im Bereich des Brennprozesses wurden in den Berichten zur Konferenz „Cement Process Engineering“ im Heft 2 der CEMENT INTERNATIONAL aus dem Jahre 2006 dargestellt. Mit dem Beitrag „Herstellung und Eigenschaften von Zementen“ in der Dezember-Ausgabe der Zeitschrift „beton“ von 2005 wurde über die Technisch-Wissenschaftliche Zementtagung 2005 des VDZ berichtet.

Erneut erschien 2006 eine aktuelle Ausgabe der „Umweltdaten der deutschen Zementindustrie“, mit denen eine umfassende, laufend aktualisierte Dokumentation umweltrelevanter Daten der deutschen Zementindustrie vorliegt. Ebenso fortgesetzt wurde der CO<sub>2</sub>-Monitoring-Report, dessen 7. Ausgabe mit Berichtszeitraum 2000 bis 2003 im Februar 2005 erschien.

In den dreimal jährlich erscheinenden VDZ-Mitteilungen wurde gewohnt zeitnah über die Tätigkeiten des VDZ und seines Forschungsinstituts informiert. Zahlreiche Beiträge waren im Berichtszeitraum u. a. den Entwicklungen auf dem Gebiet des CO<sub>2</sub>-Emissionshandels, REACH, der AKR sowie Chromatreduzierern gewidmet. Darüber hinaus wurde wie üblich über aktuelle Forschungsarbeiten im FIZ berichtet und über Ergebnisse aus anderen Forschungseinrichtungen informiert.

Zusätzlich zu den VDZ-Mitteilungen erschienen wiederum zahlreiche Sicherheitsmerkmaleblätter und -prüflisten, die wichtige Themen der Arbeitssicherheit aufgreifen und Möglichkeiten der Gefahrenprävention vorstellen.

Im Berichtszeitraum sind die Arbeiten von Herrn Dr. Kordts zum selbstverdichtenden Beton, von Herrn Dr. Stefan Punkte zu Auswirkungen des Phosphateintrags in Drehofenanlagen der Zementindustrie auf Klinkermineralogie und Zementeigenschaften und von Herrn Dr. Nils Bodendiek zur NO<sub>x</sub>-Minderung durch gestufte

Verbrennung und deren Wechselwirkung mit dem SNCR-Verfahren bei Vorcalcineranlagen der Zementindustrie erschienen. Die Arbeit zum Einfluss der Reaktionen verschiedener Zementhauptbestandteile auf den Alkalihaushalt der Porenlösung des Zementsteins von Frau Dr. Elke Schäfer erschien ebenso wie die Arbeit zur Minderung rohmaterialbedingter SO<sub>2</sub>-Emissionen in der Zementindustrie von Herrn Dr. Torsten Seidler im Jahr 2006.

Darüber hinaus wurden zahlreiche Aufsätze in führenden Fachzeitschriften veröffentlicht. Vor allem sind hier zu nennen für den Bereich Zementchemie und Verfahrenstechnik die Zeitschrift CEMENT INTERNATIONAL, die als Organ des VDZ fungiert, und für den Bereich Betontechnik die Zeitschrift „beton“.

### Tagungen

Die VDZ veranstaltet in regelmäßigen Abständen Informationsveranstaltungen oder Fachtagungen, in denen er gemeinsam mit Vertretern der Zementindustrie oder externen Experten über aktuelle Fragen berichtet, die für die Zementindustrie von Bedeutung sind. So fand im Herbst 2005 in Nürnberg die Technisch-Wissenschaftliche Zementtagung statt. Teilnehmer informierten sich über aktuelle Forschungsergebnisse aus dem Bereich des Verfahrenstechnik, des Umweltschutzes und der Leistungsfähigkeit von Zementen für unterschiedliche Betonanwendungen. Am 23. Februar 2006 begrüßte der Vorsitzende des VDZ, Herr Dipl.-Wirt.-Ing. Gerhard Hirth, die über 250 Teilnehmer der Fachtagung „Zementverfahrenstechnik“ in Neuss bei Düsseldorf. Unter der Leitung des Obmanns des Ausschusses Umwelt- und Verfahrenstechnik, Herrn Dr.-Ing. Holger Rosemann, standen Betriebserfahrungen mit Drehofenbrennern, neue Ofensteuerungssysteme, die Simulation von Verbrennungsvorgängen im Calcinator und der Einsatz neuer Kühlertechniken im Mittelpunkt der Veranstaltungen. Am 22. März 2006 kam in Düsseldorf der Betonkreis zur seiner 74. Sitzung zusammen. Mit mehreren Berichten aus der aktuellen Arbeit des Forschungsinstituts fand am 7. Dezember 2006 in Düsseldorf die Fachtagung Betontechnik statt. Der Folgetag war dem Thema Sichtbeton gewidmet: Auf der Tagung wurde über die aktuellen Ergebnisse von Forschungsvorhaben zur Verbesserung der Sichtbetonqualität berichtet. Die beiden Fachveranstaltungen umrahmten ein gemeinsames Abendprogramm, bei dem Herr Dr. Siebel, der langjährige Leiter der Abteilung Betontechnik im Forschungsinstitut, im Kreise von Wegbegleitern, Kollegen,

Mitarbeitern des Instituts und Freunden in den Ruhestand verabschiedet wurde.

### Aus- und Weiterbildung

Die Aus- und Weiterbildung und der Wissenstransfer gehören zu den wichtigsten Aufgaben des VDZ. Mit seinem Weiterbildungswerk bietet er Schulungen in technischen Grundlagen der Zementherstellung, die vertiefte Vermittlung von speziellem Fachwissen und langfristige Weiterbildungskurse für Führungskräfte an. Hierzu gehören die Lehrgänge zum Industriemeister und Produktionssteuerer, aber auch Seminare zu den Themen Qualitätssicherung, Umweltschutz und Zementanwendung.

Der Industriemeisterlehrgang „Kalk/Zement“ wird nunmehr seit fast fünf Jahrzehnten gemeinsam mit dem Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie durchgeführt. Die Lehrgänge, die in eine theoretische und eine praktische Ausbildung untergliedert sind, dauern 18 Monate und schließen mit einer Prüfung vor der Industrie- und Handelskammer Düsseldorf ab. Im Oktober 2005 startete der erste Internatsabschnitts des 22. Industriemeisterlehrgangs. Zwölf Teilnehmer aus der Kalk- und Zementindustrie wurden in den folgenden 18 Monaten auf die Abschlussprüfung vorbereitet, die am 14. März 2007 in Düsseldorf stattfand.

Neben der Aus- und Weiterbildung der Meister werden im Rahmen des VDZ-Bildungswerks auch die Leitstandsfahrer gezielt geschult. Die Weiterbildung sieht einen siebenwöchigen theoretischen Weiterbildungsabschnitt beim VDZ und einen praktischen Teil in den jeweiligen Werken vor. Während des Kurses werden den Teilnehmern die Grundlagen der Betriebs-, Brenn-, Aufbereitungs-, Mess- und Regeltechnik sowie der Umwelttechnik vermittelt.

### Wissenschaftsstiftung der Zementindustrie

Die am 2. Juli 1995 ins Leben gerufene „Gerd-Wischers-Stiftung“ fördert die Aus- und Weiterbildung wissenschaftlicher Nachwuchskräfte. Die Stiftung verfügt über ein Vermögen von € 1 533 875. Von den Zinserträgen können jeweils vier bis fünf Stipendien parallel vergeben werden. In der Berichtszeit wurden zwei Dissertationen zu den Themen Herstellung und Steuerung der Verarbeitungseigenschaften selbstverdichtender Betone sowie zur Alkalität der Porenlösung erfolgreich abgeschlossen. Eine laufende Forschungsarbeit auf dem Gebiet der Betontechnik befasst sich mit

der Wirkungsweise von Schwindreduzieren. Darüber hinaus konnten verschiedene Stipendien mit einer kürzeren Laufzeit für Diplomarbeiten auf dem Gebiet der Betontechnik und Forschungsarbeiten zur Emissionserfassung vergeben werden.

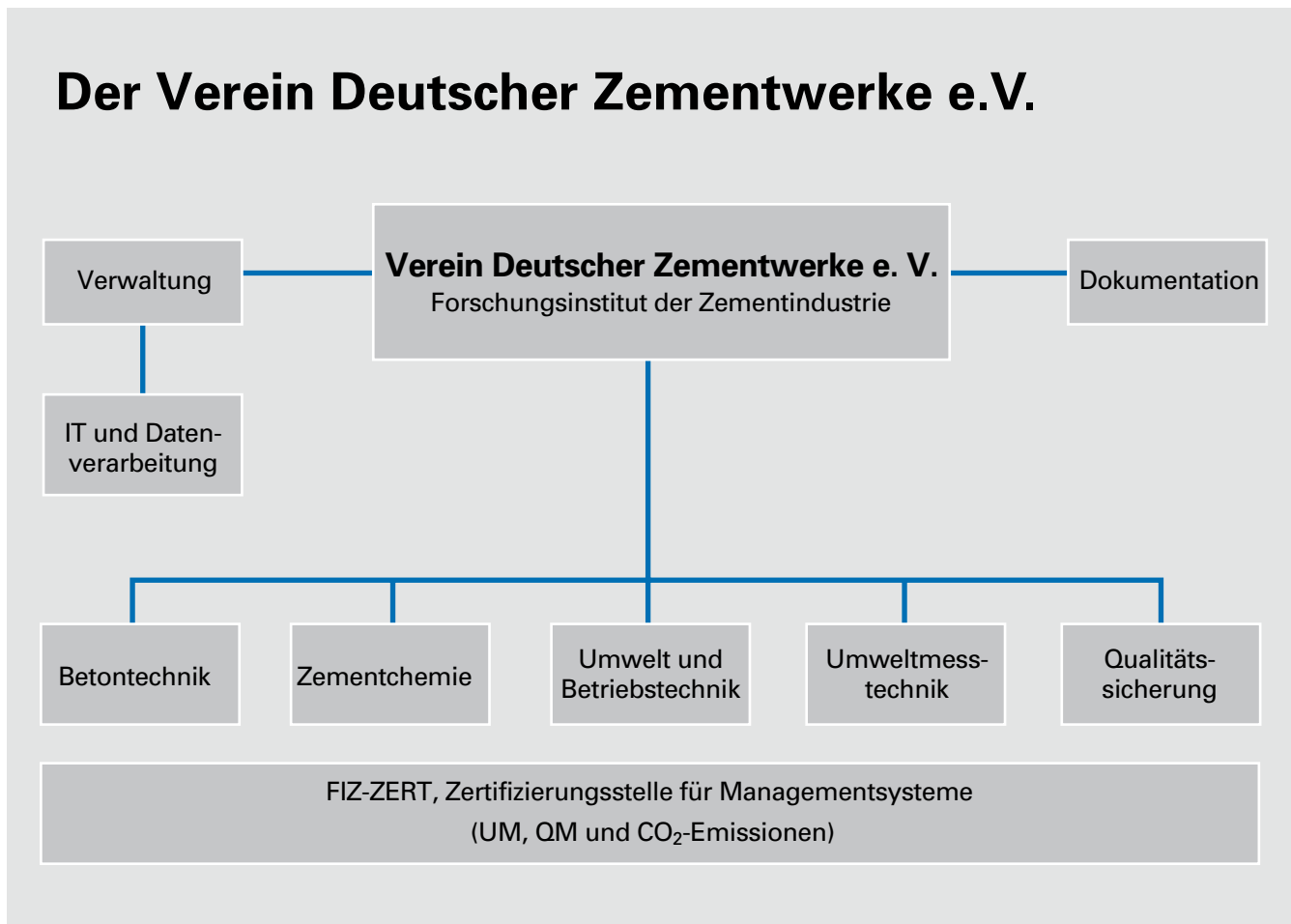
## Forschungsinstitut der Zementindustrie ■

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 zunehmendem Maße gutachterliche und beratende Unterstützung in fachlichen Angelegenheiten im Rahmen des Vereinszwecks an.

Fachlich gliedert sich das Institut in fünf Fachabteilungen. 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 17 zeigt die Struktur des Instituts mit den einzelnen Abteilungen und der Zertifizierungsstelle für Managementsysteme, FIZ-Zert.

Zum Zeitpunkt der Berichterstattung sind 144 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter im Forschungsinstitut beschäftigt; davon verfügen 44 über eine weitergehende Ausbildung an einer Universität, Technischen Hochschule oder Fachhochschule. Das Institut stellt zurzeit insgesamt neun Ausbildungsplätze in unterschiedlichen Bereichen zur Verfügung. Im Berichtszeitraum haben drei Auszubildende zum Chemielaboranten ihre Lehre im Institut erfolgreich abgeschlossen.

# Der Verein Deutscher Zementwerke e.V.



## Institutsgebäude

Durch den Neubau des Forschungsinstituts der Zementindustrie im Jahr 1956 wurde die Voraussetzung für eine neue Ära der Zementforschung geschaffen. Portland-, Eisenportland- und Hochofenzementhersteller bündelten ihre Forschung erstmals unter einem gemeinsamen Dach. Das war die Grundlage für ein Forschungsinstitut, in dem in den nachfolgenden Jahrzehnten wegweisende Untersuchungen zum Verständnis der Zementhydratation, der dauerhaften Betonbauweise sowie zur Ressourcen schonenden und umweltfreundlichen Zementherstellung durchgeführt wurden.

In den Anfangsjahren bestand das Institut zunächst aus vier Abteilungen. In den Folgejahrzehnten wurden die Organisationsstrukturen mehrfach angepasst, um den veränderten Anforderungen Rechnung zu tragen. So machte der steigende Personalstand in den 1960er Jahren eine Erweiterung erforderlich. Es wurde ein siebengeschossiger Erweiterungsbau geplant, von dem 1964/65 die vier unteren Geschosse und erst 1992/94 die restlichen Stockwerke erstellt wurden.

Heute ist das Institut in fünf gleichrangige Fachabteilungen unterteilt. Nach wie vor profitiert die Arbeit erheblich davon, dass die unterschiedlichen Disziplinen unter einem Dach zusammenarbeiten.

Auch im Berichtszeitraum wurde erneut in die Leistungsfähigkeit der Laboratorien investiert. Durch zwei Großgeräteanschaffungen wurde die bestehende Ausrüstung dem aktuellen Stand der Technik und Wissenschaft angepasst. So wurde im Herbst 2005 im Forschungsinstitut ein neues Diffraktometer in Betrieb genommen. Die Untersuchung einer Probe, die früher mehrere Stunden Messzeit erforderte, ist jetzt innerhalb weniger Minuten möglich. Schwerpunkt der messtechnischen Neuerungen war vor allem die Entwicklung leistungsfähiger Röntgendetektoren, deren Empfindlichkeit um ein Vielfaches höher ist, als dieses bei früheren Bauarten der Fall war.

Für die anorganische und organische Spurenanalyse wurde der Gerätepark des Instituts verjüngt und erweitert. Das ICP- und das GC-Massenspektrometer wurden durch neue leistungsstarke Analysatoren ersetzt. Darüber hinaus wurde für die in

den letzten Jahren stetig gestiegene Zahl von Quecksilberanalysen ein weiterer Analysator angeschafft.

Insgesamt verfügt das Forschungsinstitut heute über rund 40000 m<sup>2</sup> umbauten Raum. Bei einer Gesamtnutzfläche von rund 8400 m<sup>2</sup> entfallen 3445 m<sup>2</sup> auf das Hauptgebäude und 2915 m<sup>2</sup> auf den siebengeschossigen Erweiterungsbau. Die restlichen 2040 m<sup>2</sup> umfassen die eingeschossigen Laboratorien und die Untergeschossräume sowie ein Wohnhaus für FIZ-Mitarbeiter.

## Laborinformations- und Managementsystem (LIMS)

Die Einführung des Laborinformations-Management-Systems (LIMS) zu Beginn des Jahres 2000 hat sich bis heute sehr bewährt. Das System ermöglicht eine hohe Transparenz der Abläufe in den angeschlossenen Bereichen. Alle Beteiligte haben gleichzeitigen Zugriff auf diejenigen Projekte, die sie bearbeiten.

Zwischenzeitlich wurden auch die Abteilungen Betontechnik, Umwelt- und Betriebstechnik und Umweltmesstechnik an das Informationssystem angeschlossen.

Insbesondere können diejenigen Untersuchungen, die abteilungsübergreifend durchgeführt werden, von allen Beteiligten gleichermaßen verfolgt werden. So ermöglicht das System die Eingabe aller anfallenden Laborergebnisse der angeschlossenen Abteilungen. Hiermit ist eine deutliche Effizienzsteigerung bei gleichzeitig verbesserter Transparenz in der Projektabwicklung verbunden.

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/EDV**

Eine Hauptaufgabe in den Jahren 2005 und 2006 war es, die bestehenden EDV-Strukturen weiter zu konsolidieren. So betreut der VDZ die EDV-Infrastrukturen des BDZ, gleiches gilt für die Datenverarbeitung der BetonMarketing Deutschland GmbH in Erkrath. Durch die Anbindung der drei Standorte (Düsseldorf, Berlin, Erkrath) über das Internet ist eine problemlose Unterstützung von Düsseldorf aus möglich.

Softwaretechnisch wird auf Client-Seite das Betriebssystem Microsoft Windows 2000 bzw. XP und Office 2003 eingesetzt. Eine Migration des Betriebssystems ist für 2009 geplant. Spezialsoftware, die hauptsächlich im Rahmen der Messdatenerfassung oder allgemein im wissenschaftlichen Bereich eingesetzt wird, rundet das Spektrum ab. Auf Server-Seite wird das Betriebssystem Windows Server 2003 eingesetzt. Insgesamt werden 16 Server und 160 Arbeitsplätze an drei Standorten betreut.

Hauptprojekte im Berichtszeitraum waren die Migration der Datev-Anwendungen für die Finanzbuchhaltung auf eine Terminal-Server Basis, die Migration des Exchange-Servers (Groupware) auf die Version 2003 sowie die allgemeine Umstellung weiterer Server von Windows-2000-Servern auf Windows-2003-Server. Für unsere Besucher des Instituts wurden an zentralen Stellen im Haus AccessPoints installiert, über die ein Zugang zum Internet möglich ist.

Im Sommer 2005 wurde die VDZ-WebSite durch ein komplett neu gestaltetes System abgelöst ([www.vdz-online.de](http://www.vdz-online.de)). Ebenfalls wurde das Intranet als Informationssystem für Mitarbeiter des Instituts und das Extranet für unsere Mitglieder komplett überarbeitet. Im Durchschnitt wird der Mitgliederbereich ca. 800-mal im Monat genutzt. Das frei zugängliche Angebot wird monatlich ca. 30 000-mal abgerufen.

#### **Informationsstelle – Bibliothek**

Die Informationsstelle stellt den Mitarbeitern des Forschungsinstituts eine umfangreiche Literatursammlung zur Verfügung, die von Außenstehenden nach Absprache benutzt werden kann. Der Bestand umfasst gegenwärtig rund 39 400 Bände (Stand: 02.01.2006). Darin sind etwa 12 300 Monographien, 18 400 Serienbände, 7 100 Normen sowie zahlreiche Forschungsberichte, Jahresberichte und Sonderdrucke enthalten. Diese Zahlen sind kleiner als die der letzten Berichtszeiträume, da eine Verringerung des Bestands stattgefunden hat.

Etwa 130 Zeitschriften werden zurzeit laufend gehalten, die der aktuellen Informationsversorgung dienen. Die wissenschaftlichen Mitarbeiter werten diese im Rahmen der Zeitschriftenumläufe aus. Bei dieser Auswertung als wichtige erachtete Aufsätze werden in die Literaturdatenbank aufgenommen.

Die Literaturdatenbank umfasst momentan ca. 58 000 Datensätze. Die Datensätze beinhalten eine bibliographische Beschreibung und eine inhaltliche Erschließung durch zwei Thesauri, anhand derer der Inhalte eines Dokuments mit aussagekräftigen Worten beschrieben wird. In den kommenden Jahren wird die Literaturdatenbank bei der laufenden Nacherfassung des Zettelkatalogs einen bedeutenden Datenzuwachs erhalten.

Für die Klassifizierung und Aufstellung der Medien wird die ZKG-Systematik verwendet, mit der Monographien Themen zugeordnet und somit gruppiert zu Themengebieten aufgestellt werden können.

Die Informationsstelle ist auch bei der Herstellung, Herausgabe und dem Versand von Veröffentlichungen des VDZ beteiligt. Neben dem Vertrieb über den gemeinsam mit dem BDZ und der BetonMarketing Deutschland GmbH im Internet betriebenen Beton-Shop [www.bdz-vdz.beton-shop.de](http://www.bdz-vdz.beton-shop.de) unterhält die Informationsstelle einen umfangreichen und regen Schriftentausch mit vielen in- und ausländischen Forschungsstellen. Auf diese Weise hat sie

auch Zugriff auf ansonsten schwer zugängliche Literatur aus ihren Sammelgebieten Betontechnik, Zementchemie, Verfahrenstechnik und Umweltschutz.

Die Informationsstelle unterhält intensive Leihverkehrsverbindungen zu anderen Bibliotheken, Dokumentationsstellen und Informationseinrichtungen, um die eigenen Sammelgebiete ergänzende Literatur zu beschaffen.

Ziel der Informationsstelle ist die zeitnahe und umfassende Information der Mitarbeiter des Forschungsinstituts. Dazu werden die benötigten Informationen unabhängig von ihrem Trägermedium beschafft und bereitgestellt. Das bevorzugte Format sind jedoch elektronische Dokumente, um Ort und Zeit des Zugriffs auf Inhalte unabhängig zu gestalten. So konnte beispielsweise der elektronische Zeitschriftenumlauf erfolgreich als neue Umlaufform entwickelt und umgesetzt werden. Hierzu werden die Inhaltsverzeichnisse von Zeitschriften digitalisiert und ins Intranet eingespielt. Es erfolgt anschließend eine Benachrichtigung an alle Leser einer Zeitschrift, dass diese erschienen ist und deren Inhalt abgerufen werden kann. Mit dieser Umlaufform konnten die Nachteile konventioneller Umlaufformen überwunden werden.

Von besonderer Bedeutung für die Informationsstelle war der Wechsel auf das Datenbank- und Retrievalsystem Faust. Faust löste im Sommer 2006 die bis dahin verwendete Datenbank-Anwendung zur Literaturverwaltung ab. Die Migration der Literaturdatenbank nach Faust konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Ferner wurde mit Faust ein Bildarchiv erstellt. Das Bildarchiv ist in Anlehnung an die Literaturdatenbank entwickelt worden und bedient sich beim Archivierungsverfahren vor allem wesentlicher Vorteile der Literaturdokumentation.

Durch die hohe Flexibilität des Datenbank- und Retrievalsystems Faust wird in Zukunft eine hohe Integration der einzelnen Datenbank-Anwendungen und die Entwicklung sowie der Aufbau neuer Datenbankanwendungen als weitere Dienstleistungen möglich werden.

#### **Akkreditierung/Zertifizierung**

In den letzten Jahren haben sich die Aufgabenschwerpunkte des Forschungsinstituts verschoben. Neben den Forschungsaktivitäten wurde das umfassende Dienstleistungsangebot in allen Fragen der Zement- und Betonherstellung weiter verstärkt. Voraussetzung hierfür ist eine hohe Effizienz und



Der Führungskreis (v.l.) Christoph Müller (Betontechnik), Silvan Baetner (Zementchemie), Klaus Meyer (Verwaltung), Martin Schneider (Hauptgeschäftsführer), Franz Sybertz (Qualitätssicherung), Volker Hoenig (Umwelt und Betriebstechnik), Martin Oerter (Umweltmesstechnik)

Transparenz der Abläufe im Institut, insbesondere in den Laboratorien. Insofern war es nur konsequent, die Akkreditierung und Zertifizierung der Forschungsinstitute nach den vier Nachweisnormen ISO 9001, ISO 14001, ISO 17025 und EN 45011 voran zu treiben. So wird das Institut regelmäßigen Akkreditierungsbegutachtungen und Zertifizierungsaudits unterzogen. Im Februar 2006 waren Evaluatoren von EA (European Akkreditation) an der externen Begutachtung beteiligt. Auch wurde das System im Jahr 2005 rezertifiziert.

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.

Im Berichtszeitraum wurde u. a. die Zugriffsmöglichkeiten auf das EDV-gestützte Managementsystem durch Einführung von aktiven Intranet-Suchseiten für die Dokumente und optimierte Recherchemöglichkeiten verbessert.

## 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 der Grundlage feststehender Tagessätze angeboten und in Rechnung gestellt. Standardisierte Tätigkeiten werden als Festpreisdienstleistungen erbracht.

### Mörtel und Beton

Forschung und Dienstleistungen in den Bereichen Mörtel und Beton umfassen aktuelle und wichtige Fragestellungen auf den Gebieten der Betonausgangsstoffe, der Betontechnologie und Betonanwendung. Zu dem Dienstleistungsangebot gehört die Optimierung und Verwendung von Hochofen- und Portlandkompositzementen. Auch wurden Projekte zur Verbesserung des Säure- und des Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstands bearbeitet. Weitere Arbeiten wurden auf dem Gebiet der schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktionen und des Sulfatwiderstands durchgeführt. Insgesamt umfasst das Dienstleistungsangebot die folgenden Auftragsuntersuchungen:

- Entwicklung optimierter Beton- und Mörtelmischungen für den jeweiligen Anwendungsbereich des Kunden
- Prüfung von Frisch- und Festbeton bzw. Frisch- und Festmörtel
- Untersuchung der Dauerhaftigkeit:
  - Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand nach dem CF-, CIF-, CDF-, Würfel-, Platten- und Balken-Verfahren
  - Alkali-Kieselsäure-Reaktion in der 40-°C-Nebelkammer und mit dem 60-°C-Test (Performance-Verfahren)
  - Chloridmigrationsprüfung
  - Eindringverhalten wassergefährdender Stoffe
  - Schleifverschleiß
  - Ermittlung der Luftporenkennwerte am Festbeton
- Untersuchung der Porenstruktur, u. a. mit der Quecksilberintrusionsmessung, der Permeabilitätsmessung und der Messung der Wasseraufnahme (15 MPa)
- Rheologische Untersuchungen mit dem Viskomat
- Hydratationswärmebestimmung (isotherm und teiladiabatisch)
- Auspressen von Porenlösung aus Beton zur Bestimmung von pH-Wert und Leitfähigkeit
- Bestimmung des Zeta-Potenzials mit der elektroakustischen Messmethode
- Prüfung von Zusatzmitteln
- Erstprüfung nach DIN EN 934-2
- Elektrochemische Korrosionsprüfung nach DIN V 18998
- Untersuchung von Gesteinskörnung
- Prüfung von Einpressmörtel

## Chemie und Mineralogie

Das Verständnis der chemisch-mineralogischen Vorgänge bei der Zementherstellung und -anwendung ist eine wesentliche Voraussetzung für die Optimierung des Klinkerbrennprozesses und der Produkteigenschaften. Die Arbeiten im Bereich der Zementchemie orientieren sich an aktuellen Fragestellungen und umfassen sowohl die Beurteilung und Optimierung von Zementhauptbestandteilen als auch die Entwicklung von Prüfverfahren und Messmethoden. Hierzu verfügt das Institut über ein leistungsstarkes analytisches Labor mit einer umfangreichen technischen Ausstattung. Das Labor ist akkreditiert nach ISO/IEC 17025. Aufgrund seiner langjährigen Zusammenarbeit mit Zementherstellern und Betonanwendern besitzt das Forschungsinstitut große Erfahrung bei der Beratung, Analyse und Methodenentwicklung im Bereich chemisch-mineralogischer Prüfungen an Rohstoffen, Zementen und daraus hergestellten Produkten. Das Dienstleistungsangebot umfasst die nachfolgenden Auftragsuntersuchungen:

- Charakterisierung von Portlandzementklinkern
- Quantitative Phasenanalyse mittels Rietveld-Verfeinerung
- Referenzuntersuchungen an Zementen und Betonausgangsstoffen nach den gültigen Normen
- Bestimmung der Hydratationswärme
- Sulfatoptimierung von Zementen
- Heiz- und Brennwertbestimmungen
- Gefügeanalyse an zementären Systemen
- Umweltanalytik, z. B. Spurenanalyse der Metalle und Halbmetalle
- Bestimmung des wasserlöslichen Chromats nach TRGS 613 bzw. EN 196-10
- Emissionsprognosen bei Einsatz unterschiedlicher Roh- und Brennstoffe

## Umweltgutachten

Der hohe Stellenwert, den der Umweltschutz in der Zementindustrie hat, spiegelt sich in den zahlreichen Aktivitäten des Forschungsinstituts wider. Aufgrund der umfassenden Erfahrungen bei Anlagenbegutachtung und im Genehmigungsmanagement ergeben sich gerade im Bereich der Umweltverträglichkeitsuntersuchungen nutzbare Synergieeffekte, da auch für komplexe Vorhaben alle notwendigen Dienstleistungen aus einer Hand erbracht werden. Unsere Mitarbeiter werden kontinuierlich geschult. Ihre Einbindung in aktuelle Forschungsthemen trägt darüber hinaus dazu bei, dass für die Erstellung der Gutachten immer auf den neuesten Stand der Wissenschaft zurückgegriffen werden kann. Das

Dienstleistungsangebot umfasst die nachfolgenden Auftragsuntersuchungen:

- Emissions- und Immissionsprognosen
- Ableitbedingungen von Emissionen/ Berechnung der Schornsteinhöhe
- Empfehlung von Maßnahmen zur Verbesserung der Emissions- bzw. Immissionsituation
- Umweltverträglichkeitsstudien
- Anlagentechnische Betrachtungen
- Stand der Technik/beste verfügbare Technik
- Komplexe Ausbreitungsrechnungen
- Bodenuntersuchungen
- Schallgutachten

## Verfahrenstechnische Untersuchungen

Die Kunden des Instituts profitieren von dessen langjährigen Erfahrungen auf dem Gebiet der thermischen und mechanischen Verfahrenstechnik. Diese Erfahrungen wurden bei Beratungen zur Optimierung von Anlagen im nationalen und internationalen Umfeld gesammelt. Gemeinsam mit den Kunden entwickeln die Mitarbeiter des Instituts innovative Verfahren, die eine kostengünstige Minderung von Emissionen in Zementwerken ermöglichen. Hierfür verfügt das Institut über einen umfassenden Pool an Fachleuten sowie neueste Messtechnik und kann die vollständige Planung und Organisation aller verfahrenstechnischen Untersuchungen im Zementwerk übernehmen. Die Versuchsabwicklung und die Auswertung liegen in einer Hand. Das Leistungsprofil umfasst sowohl die thermische als auch die mechanische Verfahrenstechnik einschließlich der Bearbeitung komplexer umwelttechnischer Fragestellungen. Das Dienstleistungsangebot umfasst die nachfolgenden Auftragsuntersuchungen:

- Technische Beratung
- Stoff- und Energiebilanzen, Maßnahmen zur Verringerung des Energieverbrauchs
- Prozessmessungen an Ofen- und Mahlanlagen
- Primäre und sekundäre Maßnahmen zur Emissionsminderung
- Optimierung des Betriebs von Ofen- und Mahlanlagen
- Untersuchung von Stoffkreisläufen und deren Begrenzung
- Verfahrenstechnische Modellierung des Klinkerbrennprozesses
- Parameterstudien und Entwicklung von Optimierungsmaßnahmen

## Umweltmessungen

Das Forschungsinstitut der Zementindustrie verfügt über eine nach der internationalen Norm ISO/IEC 17025 akkreditierte Umweltmessstelle, die darüber hinaus von den deutschen Umweltbehörden als unabhängiges Prüfinstitut zugelassen und anerkannt ist. Ein interdisziplinäres Team von Ingenieuren, Naturwissenschaftlern und Laboranten mit langjähriger Praxiserfahrung bietet Dienstleistungen in allen umweltrelevanten Bereichen an, hierzu gehören vor allen Dingen sämtliche Emissionsmessungen, die sich aus den entsprechenden nationalen und internationalen Regelwerken ergeben. Neben staub- und gasförmigen Emissionen untersucht die Umweltmessstelle auch Immissionen in der Umgebung von Zementwerken. Messungen und Prognosen von Lärm und Erschütterungen runden das Leistungsprofil ab. Das Dienstleistungsangebot umfasst die nachfolgenden Auftragsuntersuchungen:

- Planung und kompetente Durchführung von Emissionsmessungen an industriellen Anlagen
- Erarbeitung von Messplänen unter Berücksichtigung der einschlägigen Richtlinien
- Emissionsmessungen und Probenahmen von luftgetragenen Schadstoffen (z. B. Stickstoffoxide, 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 sowie der Kalibrierung von kontinuierlich arbeitenden Messgeräten
- Begutachtung von Messstellen
- Durchführung von Immissionsmessungen

## Produktzertifizierung

Güteüberwachung und Qualitätssicherung von Zement und zementhaltigen Bindemitteln durch die Überwachungsgemeinschaft gehören zu den traditionellen Kernkompetenzen des VDZ. 560 Zemente aus 60 Werken werden nach nationalen und europäischen gesetzlichen Vorgaben geprüft und überwacht. Aufgrund bestehender Vereinbarungen mit ausländischen Stellen kann die Überwachung zusätzlich nach privatrechtlichen Regelwerken durchgeführt

werden. Die nationale und europäische Anerkennung als Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle durch die zuständigen Bauaufsichtsbehörden erstreckt sich auf:

- Zemente und zementartige Bindemittel
- Betonzusatzstoffe
- Betonzusatzmittel
- Mörtel und Betone
- zementhaltige Zubereitungen

Zusätzlich sind die Überwachungsgemeinschaft des VDZ und die zugehörigen Laboratorien nach EN 45011 bzw. ISO/IEC 17025 privatrechtlich akkreditiert.

### **Systemzertifizierung**

Die Zertifizierungsstelle FIZ-Zert zertifiziert und überwacht Managementsysteme (Qualität, Umwelt). FIZ-Zert ist hierfür entsprechend EN 45012 akkreditiert. Zertifiziert werden insbesondere Unternehmen aus der Steine-Erden-Industrie oder aus vergleichbaren Industrien, die sich mit der Herstellung und Anwendung von Baustoffen beschäftigen (vor allem Zement, Bindemittel, Beton, Betonwaren und -fertigteile). Grundlagen sind die Normen ISO 9001 und ISO 14001. Die Zertifizierung kann auch in Kombination mit der gesetzlich geregelten und verpflichtenden Produktzertifizierung (z. B. nach EN 197) durchgeführt werden.

### **Verifizierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen**

Im Jahr 2004 hat FIZ-Zert im Zusammenhang mit dem europäischen Emissionsrecht handel erstmals auch CO<sub>2</sub>-Emissionen verifiziert. Die Kunden konnten dabei sowohl von der hohen technischen Kompetenz als auch von den umfassenden rechtlichen Kenntnissen der Gutachter profitieren. Diese exklusiv für FIZ-Zert tätigen Personen verfügen entweder über eine entsprechende Zulassung als geprüfte Sachverständige oder sind als EMAS-Verifizierer bekannt gegeben. Damit ist gewährleistet, dass die von FIZ-Zert vorgenommenen Begutachtungen von Monitoring-Konzepten sowie die Prüfungen von Emissionsberichten höchsten Ansprüchen genügen.

# I

## 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. Die Untersuchungen zur Optimierung des Einsatzes von Sekundärbrenn- und -rohstoffen sowie dessen Auswirkungen auf den Brennbetrieb und die Umwelt bildeten auch in diesem Berichtszeitraum wiederum einen Schwerpunkt der verfahrenstechnischen Forschung. Der Anteil der Sekundärbrennstoffe am Gesamtenergiebedarf der deutschen Zementindustrie beträgt inzwischen fast 50 % (Stand: 2005). Solch hohe Substitutionsraten – einige Zementwerke verfügen inzwischen über Genehmigungen zum Sekundärbrennstoffeinsatz bis zu 100 % – erfordern eine weitgehende und feinfühligste technische Optimierung des Ofenbetriebs.

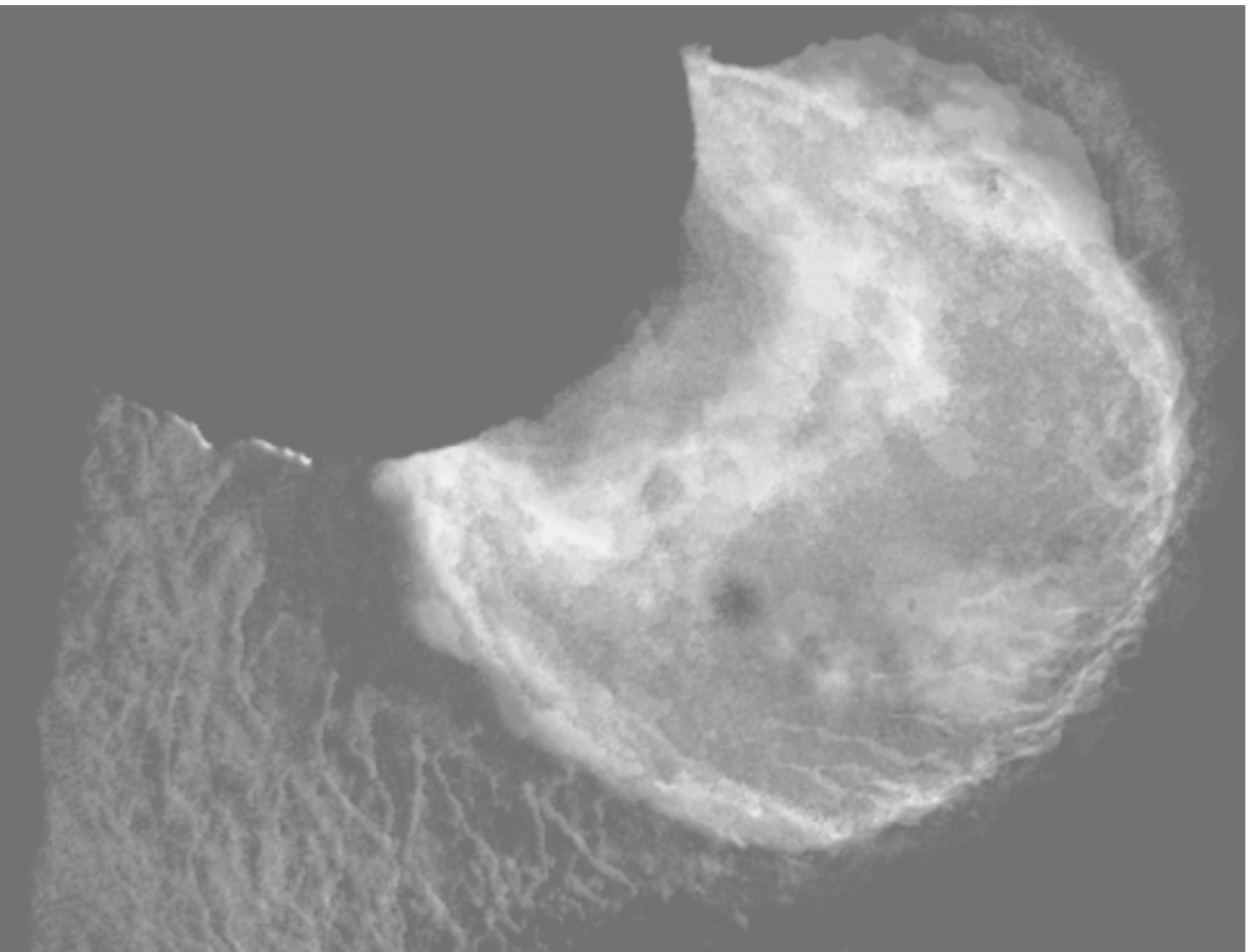
Die Optimierung des Sekundärbrennstoffeinsatzes in der Hauptfeuerung von Zementdrehofenanlagen ist im Berichtszeitraum zu einem neuen Forschungsschwerpunkt geworden. Während die Brennerhersteller eine neue Brennergeneration für hohe Substitutionsraten in der Hauptfeuerung auf den Markt gebracht haben, steht die Optimierung der BrennerEinstellung sowie ggf. des Brennstoffmix im Zentrum der Untersuchungen des Forschungsinstituts. Dazu wurde ein neuartiges optisches Analyseinstrument beschafft, das eine reproduzierbare und eindeutige Dokumentation und Bewertung von Flammenbildern ermöglicht.

Ebenfalls im Zusammenhang mit dem Einsatz von Sekundärbrennstoffen stehen die gemeinsamen Arbeiten mit den Hochschulen in Essen und Bochum. Nachdem die strömungstechnische Modellierung der Vorgänge im Calcinator bei Einsatz von Kohle weit vorangeschritten ist, wird das Projekt nunmehr um den Einsatz von Sekundärbrennstoffen erweitert. Ziel ist auch hier, eine weitgehende Optimierung und Maximierung des Sekundärbrennstoffeinsatzes im Calcinator zu erreichen.

Das verfahrenstechnische Modell des Forschungsinstituts wurde weiter entwickelt und um zusätzliche Komponenten, wie die des äußeren Kreislaufs, erweitert. Wichtige Modellierungsarbeiten wurden zur Untersuchung der verschiedenen Einflussgrößen auf den Brennstoffenergiebedarf einer Zementdrehofenanlage durchgeführt. Die Arbeiten stehen im Zusammenhang mit der Überarbeitung des BAT-Referenzdokuments für die Zementindustrie.

Im Bereich der mechanischen Verfahrenstechnik wurden Untersuchungen an halbtechnischen Mahlanlagen im Forschungsinstitut sowie bei verschiedenen Anlagenherstellern durchgeführt. Das Ziel dieser Untersuchungen war, den Einfluss des Mahlsystems auf die Klinker- bzw. Zementeigenschaften zu untersuchen. Insbesondere im Zusammenhang mit dem Einsatz hüttensandhaltiger Zemente standen weitere Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses der Mühlenatmosphäre auf die Zementeigenschaften. Hierzu wurden Untersuchungen an einer Labormahlanlage des Forschungsinstituts mit unterschiedlichen Gasatmosphären in der Mühle ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ , Wasserdampf) durchgeführt.





## Energieverbrauch

### Ofenanlagen

Die genehmigte Ofenkapazität der deutschen Zementindustrie hat sich im Berichtszeitraum von 130 020 t/d (2004) auf 110 720 t/d in 2006 verringert. Die Betriebsgenehmigungen von neun Ofenanlagen sind ausgelaufen. Die Gesamtzahl der genehmigten Ofenanlagen sank dadurch von 69 auf 60 Anlagen. In Deutschland werden heute fast nur noch Ofenanlagen betrieben, die nach dem Trockenverfahren arbeiten, die nach dem Trockenverfahren arbeiten bzw. Halbtrockenverfahren arbeiten. Darüber hinaus bestehen Genehmigungen für acht Schachtofen. Der durchschnittliche Ofendurchsatz blieb mit 2 106 t/d in 2006 nahezu unverändert. **Tafel I-1** gibt einen Überblick über den Stand der verfügbaren Ofenanlagen. Demnach entfallen 98,9 % der genehmigten Gesamtkapazität auf Anlagen mit Zyklon- bzw. Rostvorwärmern. Der Anteil der Zyklonvorwärmanlagen hat mit 90,8 % im Jahr 2006 (bezogen auf die Kapazität) weiter zugenommen. Die Anzahl der Vorcalcineranlagen ist mit elf gleich geblieben. Hiervon verfügen acht Anlagen über eine Tertiärluftleitung. Aufgrund der im Vergleich größeren Ofendurchsätze repräsentieren die Vorcalcineranlagen mehr als ein Viertel der installierten genehmigten Klinkerkapazität der deutschen Zementwerke.

Die Auslastung der Ofenanlagen stieg von 63 % in 2004 auf 67 % in 2005, was vor allem auf verstärkte Klinkerexporte sowie auf die Stilllegung mehrerer Ofenanlagen zurückzuführen ist. 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. Im geringeren Umfang wird thermische Energie für die Trocknung von weiteren Zementhauptbestandteilen, wie z. B. Hüttsand, 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 der Bundesrepublik. Aus diesem Grund ist die Zementindustrie seit jeher bemüht, ihren Energieverbrauch und damit die Brennstoffenergiekosten zu senken. **Bild I-1** zeigt die Entwicklung des spezifischen thermischen

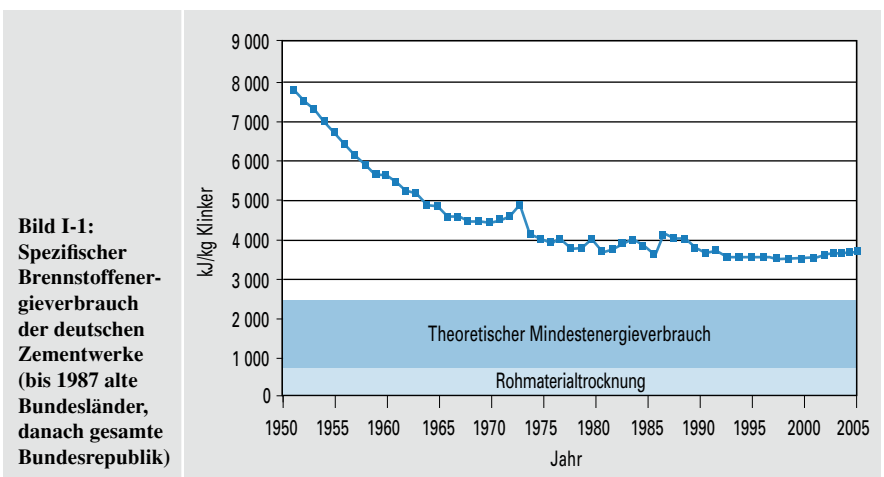
**Tafel I-1: Anzahl und Kapazität der Öfen mit Betriebsgenehmigung in der Bundesrepublik Deutschland in den Jahren 2004 bis 2006**

	Stand: 01.01.2005			Stand: 01.01.2006			Stand: 01.01.2007		
	Anzahl	Kapazität		Anzahl	Kapazität		Anzahl	Kapazität	
		t/d	%		t/d	%		t/d	%
Öfen mit Zyklonvorwärmer	45	114 750	88,3	42	103 650	91,1	41	100 550	90,8
Öfen mit Rostvorwärmer	16	14 070	10,8	11	8 970	7,9	11	8 970	8,1
Schachtofen	8	1 200	0,9	8	1 200	1,0	8	1 200	1,1
Summe	69	130 020	100	61	113 820	100	60	110 720	100
mittlere Ofenkapazität in t/d	Drehöfen	2 112		2 124		2 106			
	Schachtofen	150		150		150			
Klinkerproduktion <sup>1)</sup> (Jahr) in Mio. t/a	(2004)		(2005)		(2006)				
Auslastung <sup>2)</sup> in %	63		67		3)				

<sup>1)</sup> nach CO<sub>2</sub>-Monitoring

<sup>2)</sup> angenommene Verfügbarkeit 320 d/a

<sup>3)</sup> noch nicht verfügbar



Energieverbrauchs der Zementindustrie von 1950 bis 2005. Ab dem Jahr 1987 sind darin auch 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.

### Erste Selbstverpflichtung zum Klimaschutz erfüllt

Im Jahr 1995 hat sich die deutsche Zementindustrie gemeinsam mit anderen energieintensiven Industriebranchen verpflichtet, einen Beitrag zur Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland zu leisten. Die Selbstverpflichtung der Zementindustrie umfasste eine Minderung des spezifischen Energiebedarfs im Zeitraum 1987 bis 2005 um 20 %. Mit 2 825 kJ/kg Zement hat die

Zementindustrie ihr Ziel im Jahr 2005 erreicht.

Das Forschungsinstitut erhebt seit 1995 die Produktions- und Energieverbrauchsdaten der deutschen Zementindustrie. Diese werden in zusammengefasster und anonymisierter Form dem Rheinisch-Westfälischen Institut für Wirtschaftsforschung (RWI) zur Plausibilitätsprüfung übergeben.

Die deutsche Zementindustrie hat in den vergangenen Jahrzehnten ihren spezifischen Brennstoffenergieverbrauch durch Modernisierung ihrer Ofen- und Mahlanlagen stetig verbessert. Dieses Bestreben erhielt nach der deutschen Wiedervereinigung einen besonderen Schub, da die Anlagen der ostdeutschen Zementwerke innerhalb weniger Jahre auf den modernsten Stand der Technik erneuert wurden.

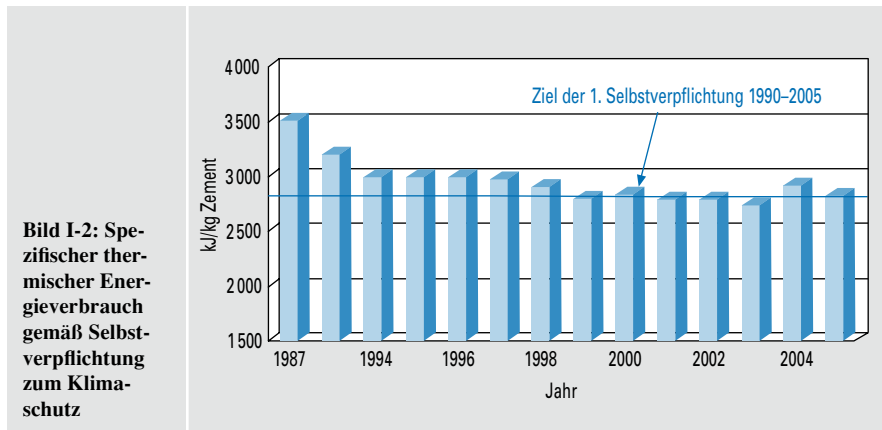
Aber auch in den alten Bundesländern wurden einige Altanlagen durch neue Anlagen ersetzt. Eine weitere wichtige Maßnahme zur Senkung des Brennstoffenergiebedarfs je Tonne Zement besteht in der verstärkten Produktion von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen.

Aufgrund der im betrachteten Zeitraum stark zurückgegangenen Zementproduktion sank der absolute Brennstoffenergiebedarf der deutschen Zementindustrie von 1987 bis 2005 um etwa ein Viertel. Diese starke Verminderung war auch auf die Reduzierung des auf die Tonne bezogenen spezifischen thermischen Energiebedarfs um 20 % im betrachteten Zeitraum zurückzuführen (**Bild I-2**). Während der spezifische thermische Energiebedarf der Drehofenanlagen in 1987 noch bei über 3500 kJ/kg Zement lag, betrug er im vergangenen Jahr nur noch 2825 kJ/kg Zement. Neben der Steigerung der Energieeffizienz der Drehofenanlagen trug dazu auch die Verminderung des Klinker/Zement-Faktors bei. Dieser betrug 86 % im Jahr 1987 und wurde bis zum Jahr 2005 auf 75,9 % vermindert. Damit hat die deutsche Zementindustrie ihre erste Zusage zum Klimaschutz erfüllt.

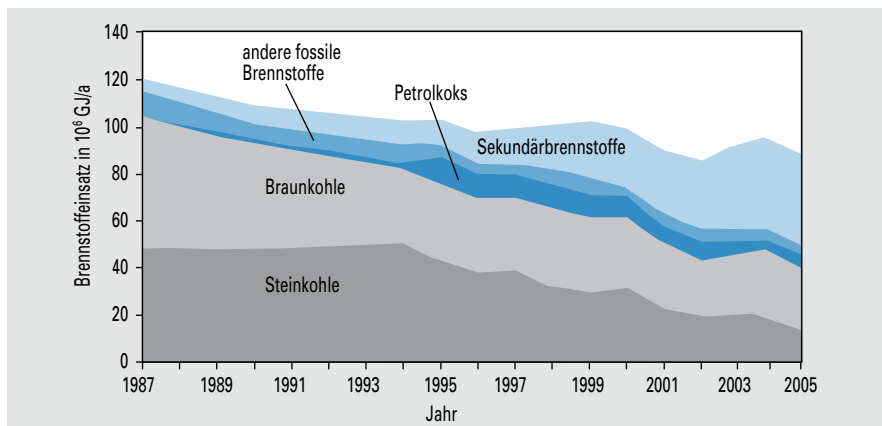
**Brennstoffmix**

Die Struktur der in der deutschen Zementindustrie eingesetzten Brennstoffe hat sich in den vergangenen Jahren weiter stetig verändert. Der gesamte Brennstoffeinsatz ist von 1987 bis 2005 u. a. wegen des starken Produktionsrückgangs von 119,9 auf 88,7 Mio. GJ/a gesunken. Dies entspricht einer absoluten Verminderung um 26,2 %. Der Anteil der Sekundärbrennstoffe stieg, wie aus **Bild I-3** hervorgeht, im Berichtszeitraum weiter an und betrug im Jahr 2005 nunmehr 48,8 % gegenüber 23,0 % im Jahr 1999. Durch den verstärkten Einsatz von Sekundärbrennstoffen wurde im Berichtszeitraum vorwiegend Steinkohle substituiert. Die Verbräuche der Brennstoffe Heizöl EL, Heizöl S und Erdgas liegen weiterhin auf sehr niedrigem Niveau. Sie werden vorwiegend zum Anfahren der Ofenanlagen verwendet.

Die Aufschlüsselung der Sekundärbrennstoffe für die Jahre 2003 und 2005 zeigt, dass die Rolle der traditionellen Sekundärbrennstoffe Altreifen und Altöl relativ abgenommen hat. Wie **Tafel I-2** zeigt, stieg der Einsatz von Altreifen auf knapp 290000 t/a, während die eingesetzte Altölmenge von 116000 t/a im Jahr 2003 auf 92000 t/a im Jahr 2005 zurückging. Deutlich gesteigert wurde der Einsatz von Fraktionen aus Industrie- und Gewerbeabfällen



**Bild I-2: Spezifischer thermischer Energieverbrauch gemäß Selbstverpflichtung zum Klimaschutz**



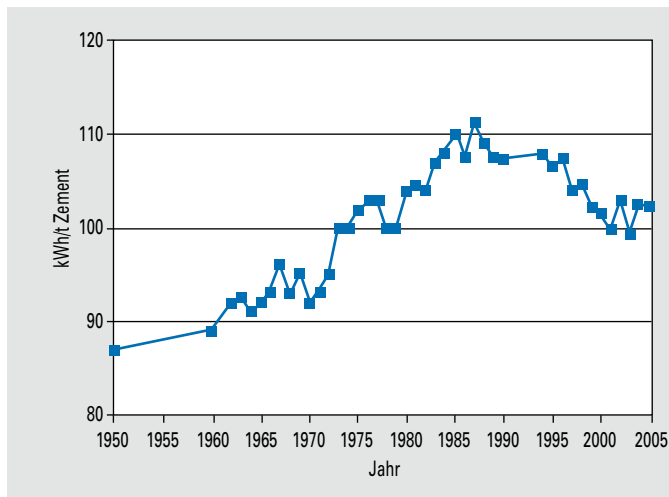
**Bild I-3: Brennstoffeinsatz in der deutschen Zementindustrie seit 1987**

**Tafel I-2: Einsatz von Sekundärbrennstoffen in der deutschen Zementindustrie**

Sekundärbrennstoff	2003 in 1000 t/a	2005 in 1000 t/a
Reifen	247	288
Altöl	116	92
Fraktionen aus Industrie-/Gewerbeabfällen, davon:	626	1116
Zellstoff, Papier und Pappe	156	237
Kunststoff	177	309
Verpackungen	9	3
Abfälle aus der Textilindustrie	15	-
Sonstige	269	567
Tiermehle und -fette	452	355
Aufbereitete Fraktionen aus Siedlungsabfällen	155	198
Altholz	48	42
Lösemittel	48	101
Bleicherde	20	11
Klärschlamm	4	157
Sonstige wie:	17	28
Ölschlamm		
Organische Destillationsrückstände		

tionen aus Industrie- und Gewerbeabfällen von 626000 t/a in 2003 auf 1116000 t/a in 2005. Auch der Einsatz aufbereiteter Fraktionen aus Siedlungsabfall wurde auf 198000 t/a gesteigert. Der Einsatz von Tiermehlen und -fetten begann im Jahr 2000 nach der BSE-Krise und wurde zu-

nächst auf 452000 t/a in 2003 gesteigert. Da diese Stoffe inzwischen verstärkt auch in anderen Mitverbrennungsanlagen, wie z. B. Kraftwerken, verwertet werden, ging deren Einsatz in der Zementindustrie inzwischen auf 355000 t (Stand: 2005) zurück.



**Bild I-4: Spezifischer elektrischer Energieverbrauch der deutschen Zementwerke (bis 1987 alte Bundesländer, danach gesamte Bundesrepublik)**

### 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-4** zeigt die Entwicklung des elektrischen Energieverbrauchs der deutschen Zementwerke im Zeitraum von 1950 bis 2005. Der langjährige Anstieg des elektrischen Energieverbrauchs konnte nach der Wiedervereinigung Deutschlands gestoppt werden. In den Folgejahren stabilisierte er sich zwischen 100 und 102 kWh/t Zement.

Zemente mit weiteren Hauptbestandteilen neben Klinker, wie Hüttensand oder Kalkstein, erfordern einen höheren Mahlernergieaufwand, 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 immer noch eine Nachmahlung in Kugelmühlen erforderlich. Somit kann das Potenzial der Energieeinsparung weiterhin nicht in vollem Umfang nutzbar gemacht werden. Auch eine getrennte Mahlung der verschiedenen Hauptbestandteile und deren anschließendes Mischen in Mischanlagen scheint im Rahmen der betriebsüblichen Möglichkeiten keine signifikanten Minderungen zu erlauben.

### Energiebedarf ■

#### Was ist Stand der Technik bei der Energieeffizienz des Klinkerbrennprozesses?

Für die Energieeffizienz von Drehofenanlagen der Zementindustrie wurde im Jahr 2001 im europäischen BAT(Best Available Techniques)-Dokument (BREF) ein Wert von 3000 kJ/kg Klinker festgelegt. Im Zeitraum 2006/2007 steht das Dokument zur Revision an. Der im bisherigen Dokument genannte Wert wird der Vielfalt des Klinkerherstellungsprozesses jedoch nicht gerecht und ist deshalb im Normalbetrieb nicht bzw. nur in Kurzzeit-Leistungstests erreichbar. Dennoch wird dieser Wert als Basis- und Vergleichsgröße verwendet. Um diesen Wert im Rahmen der BREF-Revision durch eine praxisorientierte Bandbreite zu ersetzen, hat das Forschungsinstitut Modellrechnungen durchgeführt und gemeinsam mit den Mitgliedswerken Praxiserfahrungen zusammengestellt.

Die Energieeffizienz von Industrieanlagen ist seit vielen Jahren in der politischen Diskussion (z. B. BAT-Prozess, Selbstverpflichtung der Industrie zum Klimaschutz, Energiesteuern). Im Rahmen der Einführung eines europaweiten CO<sub>2</sub>-Emissionshandels-Systems wurden CO<sub>2</sub>-Benchmarks für Neuanlagen – u. a. auch für Drehofenanlagen der Zementindustrie – formuliert, die in der deutschen Gesetzgebung in der so genannten Zuteilungsverordnung niedergeschrieben wurden. Die Benchmarks für den Herstellungsprozess für Zementklinker wurden ausgehend von dem im BAT-Referenz-Dokument für die Zementindustrie beschriebenen Energieeffizienzwert von 3000 kJ/kg Klinker berechnet. Allerdings wurden dabei verfahrenstechnische Para-

meter, wie die Rohmaterialfeuchte (bzw. Anzahl der Zyklonstufen) und die Bypassrate, berücksichtigt.

Der genannte BAT-Wert gilt für eine Vorcalcineranlage mit fünfstufigem Zyklonvorwärmer und einer Klinkerkapazität von 3000 t/d. Ansonsten berücksichtigt dieser Wert nicht die unterschiedlichen, in der Praxis bedeutsamen Einflussgrößen und Randbedingungen für die Energieeffizienz, wie z. B. die Feuchte und Zusammensetzung des Rohmaterials, die eingesetzten Brennstoffe, die angestrebte Klinkerqualität, An- und Abfahrvorgänge sowie die Bypassrate. Im normalen Betrieb wird dieser sehr niedrige Wert deshalb kaum von einer Anlage im Jahresmittel eingehalten. Erreichbar ist er nur unter sehr speziellen Randbedingungen und im Kurzzeit-Leistungstest.

Der VDZ-Ausschuss Umwelt- und Verfahrenstechnik hat deshalb im Jahr 2004 eine Arbeitsgruppe eingerichtet, welche die verschiedenen technischen Einflussgrößen auf die Energieeffizienz von Zement-Drehofenanlagen erarbeitet, entsprechende Praxiserfahrungen zusammengestellt und soweit möglich quantifiziert hat. Diese detaillierten Informationen wurden in den Revisionsprozess für das Zement-BREF eingebracht. Ziel dieser Arbeit ist es, den dort genannten Energieeffizienzwert praxisnäher zu beschreiben. Mittelfristig können diese Informationen dann auch für die Formulierung realistischerer CO<sub>2</sub>-Benchmarks im Rahmen des Emissionshandels genutzt werden.

Die Einflüsse der wichtigsten Betriebsparameter auf den Energiebedarf einer modernen Drehofenanlage wurden durch Berechnungen mit dem am FIZ entwickelten verfahrenstechnischen Prozessmodell untersucht und quantifiziert. Die Ergebnisse zeigen, dass abhängig von den jeweiligen Randbedingungen ein Mindestenergiebedarf von 3000 bis 3800 MJ für das Brennen einer Tonne Zementklinker nach dem so genannten Trockenverfahren erforderlich ist. Dies bedeutet, dass die Ofenanlagen mit derselben hohen Energieeffizienz betrieben werden, obwohl sie aufgrund z. B. unterschiedlicher Roh- bzw. Brennstoffeigenschaften oder Ofenkapazitäten einen unterschiedlichen spezifischen Brennstoffenergiebedarf aufweisen. Zusammenfassend hat der VDZ deshalb über das CEMBUREAU im BAT-Revisionsprozess folgende Bereiche für den Brennstoffenergiebedarf einer modernen Drehofenanlage –

abhängig von der Zahl der Vorwärmerstufen – vorgeschlagen:

- 3 Stufen: 3 400 bis 3 800 kJ/kg Kl
- 4 Stufen: 3 200 bis 3 600 kJ/kg Kl
- 5 Stufen: 3 100 bis 3 500 kJ/kg Kl
- 6 Stufen: 3 000 bis 3 400 kJ/kg Kl

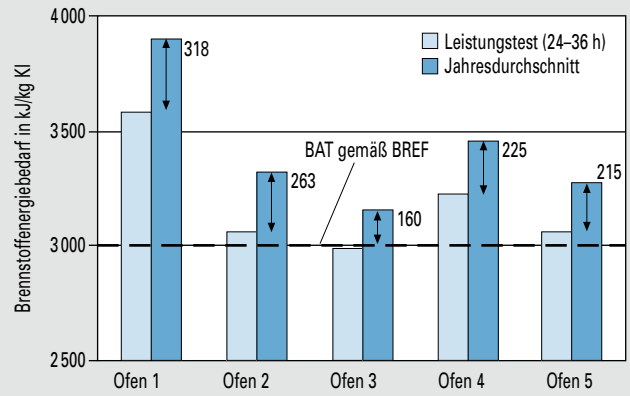
Aus Sicht der Zementindustrie stellen diese Werte die beste verfügbare Technik im Sinne der IPPC-Richtlinie dar.

Zur Unterstützung dieser Arbeiten führte das Forschungsinstitut mit dem vorhandenen verfahrenstechnischen Prozessmodell Berechnungen durch. Diese liefern neben umfangreichen Prozessgrößen – wie Massen- und Volumenströmen sowie deren Zusammensetzungen, Gas- und Feststofftemperaturen und Wärmeverlusten – insbesondere auch den spezifischen Energiebedarf zum Brennen des Klinkers. Zunächst wurde eine Referenzanlage abgebildet, die der Definition des BREF entspricht (Vorcalcineranlage mit fünfstufigem Zyklonvorwärmer, Klinkerkapazität 3 000 t/d) und die bei Betrieb mit Steinkohle einen spezifischen Brennstoffenergieverbrauch von etwa 3 000 kJ/kg Klinker erreicht. Dabei wurde kein Bypass berücksichtigt und ein Klinker mit einem Kalkstandard von 97 zugrunde gelegt. Darauf aufbauend wurden dann die Auswirkungen folgender relevanter Parameter auf den Energiebedarf ermittelt:

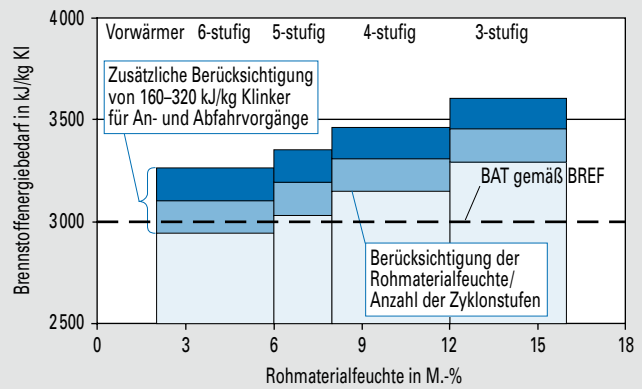
- Rohmaterialfeuchte
- Produktionskapazität der Anlage
- Rohmaterialzusammensetzung und Klinkerqualität
- Brennstoffeigenschaften und Brennstoffmix
- Bypassbetrieb und Bypassrate

Die Berechnungsergebnisse belegen, dass der im BREF-Dokument genannte Wert für die Energieeffizienz bei Nutzung modernster Technologien nur unter speziellen Randbedingungen hinsichtlich der Betriebsparameter sowie im Kurzzeit-Leistungstest erreichbar ist. Wie in **Bild I-5** dargestellt, zeigen die Praxiserfahrungen, dass der spezifische Energiebedarf selbst solcher Anlagen bzw. Produktionsstandorte im Jahresgang durch An- und Abfahrvorgänge um 160 bis 320 kJ/kg Klinker steigt. Weiterhin kann die lokal gegebene Rohmaterialfeuchte Ursache dafür sein, dass die Anlage mit einer geringeren Zahl von Zyklonstufen gebaut werden muss. Dies kann eine Erhöhung des Wärmebedarfs um deutlich mehr als 200 kJ/kg Klinker bedingen. **Bild I-6** zeigt diesen Einfluss unterschiedlicher Rohmaterialfeuchten respektive der damit

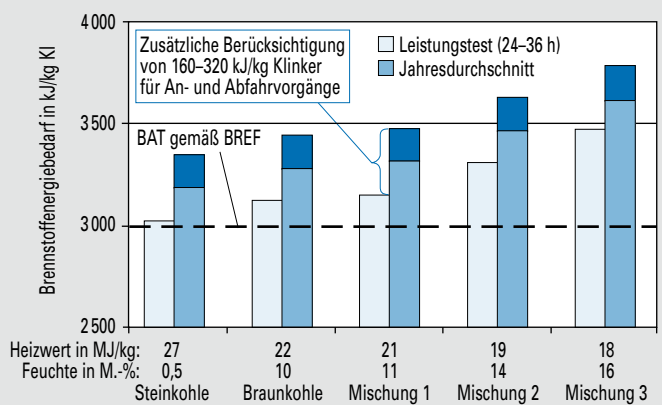
**Bild I-5:** Vergleich zwischen dem spezifischen thermischen Energiebedarf von fünf modernen Ofenanlagen während Kurzzeit-Leistungstests und im Jahresdurchschnitt



**Bild I-6:** Einfluss der Rohmaterialfeuchte auf den spezifischen Brennstoffenergiebedarf (VC-Anlage mit fünfstufigem Zyklonvorwärmer, Brennstoff Steinkohle)

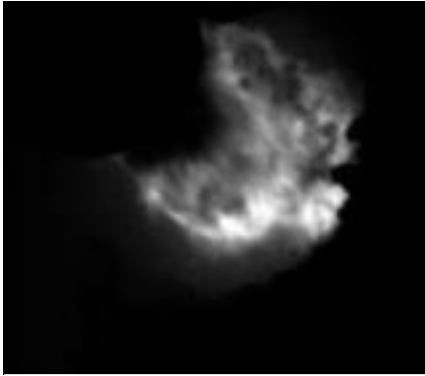


**Bild I-7:** Einfluss der Brennstoffeigenschaften auf den spezifischen Brennstoffenergiebedarf (VC-Anlage mit fünfstufigem Zyklonvorwärmer)

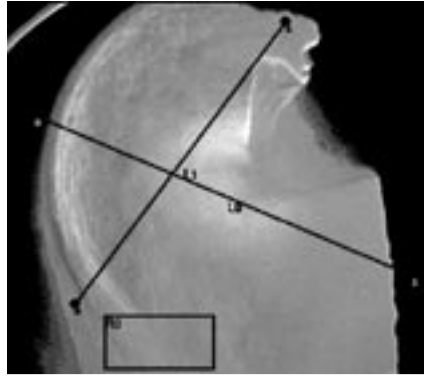


verbundenen unterschiedlichen Anzahl der Zyklonstufen des Vorwärmers auf den Energiebedarf einer Drehofenanlage. Die Darstellung berücksichtigt weiterhin die aus Praxiserfahrungen ermittelte Erhöhung des spezifischen Energiebedarfs durch An- und Abfahrvorgänge. Eine Steigerung um mehr als 400 kJ/kg Klinker kann auch durch die Eigenschaften der eingesetzten Brennstoffe (z. B. Feuchtegehalt, Reaktivität, Heizwert und heizwertbezogene Verbrennungsluftmenge) begründet sein. **Bild I-7** zeigt diesen Effekt für unter-

schiedliche Brennstoffmischungen, wobei die Zusammensetzungen von in deutschen Zementwerken eingesetzten Regel- und Sekundärbrennstoffen zugrunde gelegt wurden. Ebenso kann der Betrieb eines Gasbypasses abhängig von der Bypassrate zu einem um etwa 100 kJ/kg Klinker erhöhten Energiebedarf führen. In der gleichen Größenordnung bewegen sich die Auswirkungen unterschiedlicher Rohmaterialzusammensetzungen (z. B. hoher bzw. niedriger Kalkstandard).



**Bild I-8:** In Graustufen umgewandeltes Livebild einer Flamme



**Bild I-9:** Farbcodiertes Thermobild mit Thermografieobjekten

## Anlagenbetrieb ■

### Optische Flammendiagnose

Für die Beobachtung von Drehofenflammen der Zementindustrie kommen heute vermehrt Thermografiesysteme zum Einsatz. Im Praxisbetrieb sind diese Systeme häufig in die Regelungskonzepte für den Ofenbetrieb eingebaut und liefern z. B. mehrdimensionale Temperaturdaten der Flamme bzw. der Sinterzone.

Unter Forschungsaspekten können diese Thermografiesysteme jedoch auch zur reproduzierbaren Vermessung und Dokumentation von Drehofenflammen eingesetzt werden. Das Forschungsinstitut verwendet deshalb ein solches System im Rahmen von Ofenuntersuchungen. Dieses portable Thermografiesystem ermöglicht die thermografische Analyse des Brennvorgangs sowie die Auswertung und Dokumentation der Flammengeometrie und Temperaturverteilung im vorderen Bereich des Ofens bzw. der Sinterzone, einem Bereich, der in dieser Form bisher nicht zugänglich war.

Die Ofenkamera besteht aus einer lichtstarken Optik und einer speziellen CCD-Kamera. Die Kamera erzeugt ein Livebild vom Flammenfuß im Brennernahbereich im visuellen Strahlungsspektrum. Das **Bild I-8** zeigt solch ein Livebild nach Umwandlung in ein Graustufenbild. Das Thermografiesystem führt basierend auf den Strahlungsintensitäten der Wellenlängen für Grün und Rot eine Temperaturberechnung nach dem Quotientenverfahren durch und erzeugt ein Thermobild, in dem die Temperaturverteilung farbcodiert dargestellt wird.

Über das Thermobild gelegte Thermografieobjekte (**Bild I-9**) erfassen die Temperaturen im Bereich des Objekts. Die Thermografieobjekte Punkt und Rechteck liefern jeweils eine Temperatur eines Detailausschnitts der Flamme, beim Linienzug werden die farbcodierten Temperaturwerte an jedem Punkt entlang des Linienzugs aufgezeichnet. In Thermogrammen werden die erfassten Temperaturwerte der Thermografieobjekte Punkt und Rechteck als zeitliche Funktion in Form eines Grafen dargestellt. Für die Auswertung der Flammengeometrie und der Temperaturverteilung werden die Thermogramme von Linienzügen herangezogen. Auf der Abszisse wird die fortlaufende Zeit, auf der Ordinate die dimensionslose Länge des Linienzugs aufgetragen. Im Thermogramm wird die Temperatur farbcodiert in Abhängigkeit von Ort und Zeit dargestellt. Das Thermogramm zeigt die zeitliche Entwicklung der Temperaturverteilung eines Flammenquerschnitts entlang eines Linienzugs (**Bild I-12**). Zur Auswertung und Dokumentation können alle Werte in einer Datenbank gespeichert werden.

Der derzeitige Untersuchungsgegenstand im Forschungsinstitut ist die Beeinflussung der Temperaturverteilung sowohl durch Brennstoffe, insbesondere durch Sekundärbrennstoffe, als auch durch verschiedene Brennertypen bzw. -einstellungen. Im Berichtszeitraum wurden erste Erfahrungen mit dem Gerät im Werkseinsatz gesammelt. Für die weitergehende Auswertung und Versuchsdokumentation wurden entsprechende Werkzeuge für das Thermografiesystem entwickelt und programmiert sowie eine Datenbank angelegt. Im Rahmen eines Forschungsprojekts war das System bereits in zwei mehrwöchigen Ofenversuchen im Einsatz.

### Optimierung der Drehofenfeuerung bei Einsatz von Sekundärbrennstoffen

In den 1990er Jahren wurden die damals in der Zementindustrie meist eingesetzten Mehrkanalbrenner durch so genannte LowNO<sub>x</sub>-Brenner ersetzt. Diese Brenner sorgten u. a. mittels eines deutlich verminderten Primärluftvolumenstroms für eine reduzierte NO-Bildung in der Drehofenflamme. Für einen hohen Sekundärbrennstoffeinsatz sind diese Brenner jedoch weniger geeignet, da dieser einen hohen Mischimpuls erfordert, der mit einem geringen Primärluftvolumenstrom kaum erreicht werden kann. Deshalb haben einige Zementwerksbetreiber die LowNO<sub>x</sub>-Brenner durch neue, so genannte Multifuel Burner ersetzt. Dabei besteht allerdings die Möglichkeit, dass die NO<sub>x</sub>-Bildung in der Flamme wieder verstärkt wird.

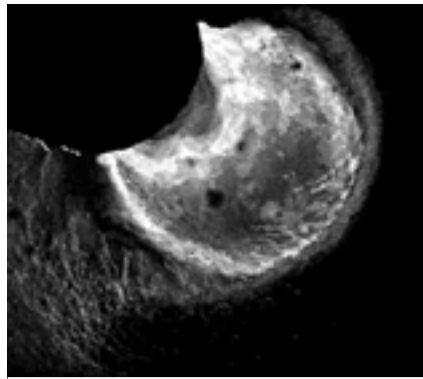
Diese Mehrkanal- und Vielbrennstoffbrenner sind durch eine Vielzahl an Lanzen, Rohren und Ringkanälen charakterisiert, die flexibel die Verbrennung von gemahlener und grobstückigen festen, von flüssigen und pastösen sowie gasförmigen Brennstoffen ermöglichen. Die Intensität der Wärmedarbietung der Brennstoffe und das Temperaturprofil im Drehofen werden sowohl durch das Verbrennungsverhalten der Brennstoffe, also deren physikalische und chemische Eigenschaften, als auch durch die Einstellung des Drehofenbrenners beeinflusst. Mit der Geometrie des Ausströmssystems am Brennermund und dem Primärluftvolumenstrom durch den Brenner werden die Länge, Divergenz und Rotation der Flamme und somit eine für den Sinterprozess günstige Flammenform eingestellt. Ein starker Austrittsimpuls und die hohe Relativgeschwindigkeit zwischen Primärluft und Sekundärluft erzeugen eine starke Turbulenz und damit eine besonders intensive Vermischung von Brennstoff und Verbrennungsluft.

In einem Forschungsprojekt untersucht das FIZ die Einflüsse auf die Flamme und die Temperaturverteilung im Ofenraum – einerseits durch die eingesetzten Brennstoffe und andererseits durch die Einstellung des Brenners. Beispielhaft an der flugfähigen Fraktion von Industrie- und Gewerbeabfällen sollen Betriebseinstellungen für Drehofenbrenner gefunden werden, die bei gleich bleibender Produktqualität, niedrigen Schadstoffemissionen und ohne Beeinträchtigung des Ofenbetriebs die Erhöhung der Substitutionsrate von Sekundärbrennstoffen deutlich über 50 % in der Hauptfeuerung ermöglichen.

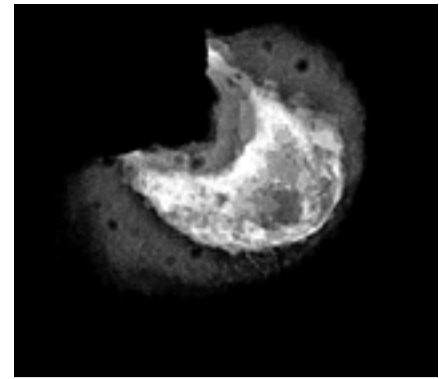
Für die thermische Analyse der Flamme sowie für die Auswertung und Dokumentation der Flammgeometrie und der Temperaturverteilung im Bereich der Sinterzone kommt das oben vorgestellte portable Thermografiesystem zum Einsatz. Zur Bewertung des Klinkerbrennprozesses werden zu ausgewählten Versuchseinstellungen Klinkerproben mineralogisch untersucht. Gasanalysen an verschiedenen Messstellen der Ofenanlage werden zur Beurteilung der Schadstoffentwicklung durchgeführt.

Die **Bilder I-10** und **I-11** zeigen beispielhaft den Einfluss des Flammendralls auf die Temperaturverteilung auf dem Flammkörper, die Flammenform und die Ausbreitung der Flamme im Ofenquerschnitt. Links oben im Bild befindet sich der Brenner, nach rechts unten blickt man in den Ofenraum hinein. Heiße Temperaturbereiche auf dem Flammkörper werden mit hellgrauen bis weißen Farbtönen dargestellt, die vergleichsweise kühlen Bereiche erscheinen in dunkelgrauen bis schwarzen Farbtönen. Bild I-10 zeigt das Thermobild einer Flamme mit starker Verdrallung, in Bild I-11 ist das Thermobild einer gering verdrallten Flamme etwa eine Stunde nach einer Brennerverstellung zu sehen. Die zeitliche Entwicklung der Flammenformen wird in so genannten Thermogrammen dargestellt. In **Bild I-12** ist im oberen Thermogramm ein vertikaler Querschnitt der Flamme herausgeschnitten und die zeitliche Veränderung des Flammendurchmessers sowie die Veränderung des Temperaturprofils des gewählten Flammenquerschnitts bei Minderung des Dralls dargestellt. Im unteren Thermogramm ist die Veränderung des Temperaturprofils entlang der verlängerten Brennerachse dargestellt, wobei der Punkt 0 der Messlinie am Brennermund liegt. Das untere Thermogramm zeigt demnach die Aufheiz- und Zündstrecke der Brennstoffe.

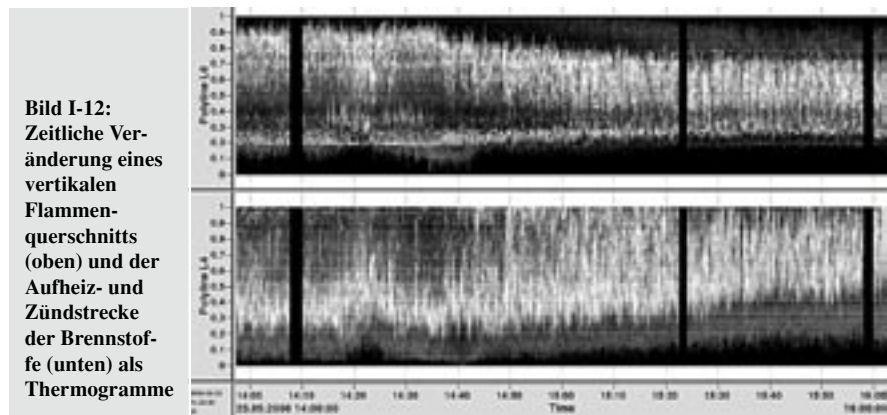
Wie Bild I-10 zeigt, erzeugt ein hoher Drall der Primärluft eine breite Flamme, die nahe am Brennermund anliegt und ihr Temperaturmaximum ebenfalls nahe am Brenner hat. Im oberen Thermogramm des Bilds I-12 nimmt die Flamme auf der Ordinate den Bereich von 0,2 bis 0,9 Längeneinheiten ein, auf dem unteren Thermogramm wird die Zündung der Brennstoffe oder der Flammenfuß in einer Entfernung von 0,2 bis 0,3 Längeneinheiten vom Brennermund angezeigt. Das Ergebnis einer Minderung des Flammendralls ist eine schlanke Flamme in Bild I-11. Die Zone der maximalen Temperatur entfernt sich vom Brennermund und die Aufheizstrecke wird länger.



**Bild I-10:** Thermobild einer kurzen, aufgeweiteten Flamme mit hoher Verdrallung



**Bild I-11:** Thermobild einer langen, schlanke Flamme mit geringer Verdrallung



**Bild I-12:** Zeitliche Veränderung eines vertikalen Flammenquerschnitts (oben) und der Aufheiz- und Zündstrecke der Brennstoffe (unten) als Thermogramme

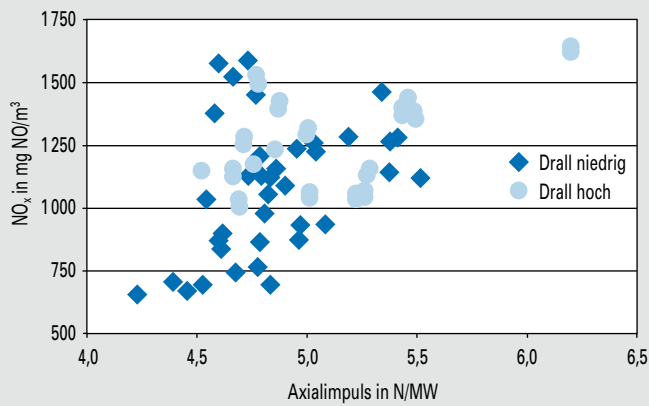
Im oberen Thermogramm verjüngt sich der vertikale Flammendurchmesser und nimmt nur noch den Bereich von etwa 0,25 bis 0,75 Längeneinheiten ein. Dabei vergleichmäßig sich die Temperaturverteilung auf der Flammenhülle. Im unteren Thermogramm entfernt sich der maximale Temperaturbereich vom Brennermund und die Aufheiz- und Zündstrecke verlängert sich auf über 0,45 Längeneinheiten.

Mit der Verdrallung der Flamme wird wesentlich der Divergenzkegel des ausströmenden Brennstoff-Luft-Gemischs und des Flammkörpers beeinflusst. Je stärker der tangentialer Impuls ist, desto größer wird der Öffnungswinkel des Kegels. Der steilere Winkel zwischen Brennstoff- und Sekundärluftstrom verbessert die Vermischung. Die Aufheizung der Brennstoffe erfolgt schneller und der Zündpunkt liegt nahe am Brennermund, wobei die Verbrennung intensiviert und die Flammenwurzel heißer wird.

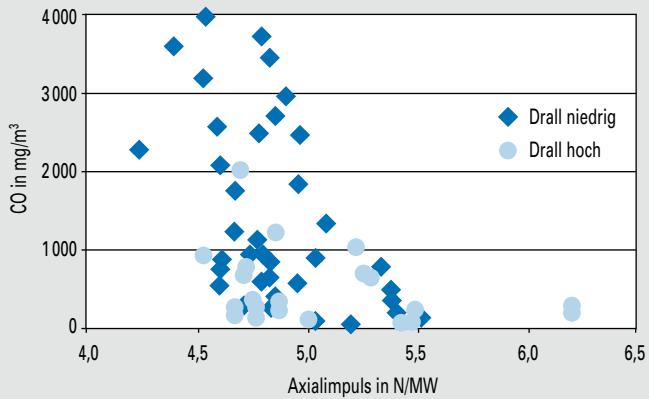
Die Einmischung der Sekundärluft in den Brennstoffstrom sowie die Intensität der Verbrennung wirken sich deutlich auf die

Bildung und den Abbau von Stickstoffoxiden und Kohlenstoffmonoxid im Bereich der Flamme aus. Die **Bilder I-13** und **I-14** zeigen die Konzentrationen von Stickstoffoxiden und Kohlenstoffmonoxid im Ofenlauf in Abhängigkeit des vom Brenner erzeugten Axialimpulses sowohl für gering als auch für stark verdrallte Flammen. Mit steigendem Axialimpuls steigen die minimal erreichbaren Stickstoffoxidkonzentrationen. Im Gegenzug dazu sinken die maximal möglichen CO-Konzentrationen. Für hohen Drall ist dabei die Streubreite der Konzentrationen geringer als bei niedrigem Drall. Der Abbau von Kohlenstoffmonoxid wird somit durch einen hohen Drall im Vergleich zu einer schwach verdrallten Flamme deutlich begünstigt. Ein hoher Drall stabilisiert die Flamme und macht sie unempfindlicher gegenüber Betriebschwankungen.

Grund hierfür ist, dass die Verdrallung die Einmischung der heißen Sekundärluft in den Brennstoffstrom fördert. Ein hoher Drall fördert demnach das Sauerstoffangebot in der heißen Reaktionszone. Dadurch steigt die Stickstoffoxidbildung tendenziell



**Bild I-13: Stickstoffoxidkonzentrationen im Ofeneinlauf bei zwei unterschiedlichen Dralleinstellungen**



**Bild I-14: Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen im Ofeneinlauf bei zwei unterschiedlichen Dralleinstellungen**

an. Das verbesserte Sauerstoffangebot führt auch zu einer umfassenderen Oxidation der Brennstoffe.

**Verwertung von Bypassstaub**

Viele Zementwerke betreiben aufgrund ihrer lokalen Rohstoffsituation seit jeher Bypassanlagen, um den Chlor- und Alkalihaushalt ihrer Ofenanlagen zu regeln. Um eine Ansatzbildung in den Ofenanlagen sicher zu vermeiden und dadurch einen gleichmäßigen Ofenbetrieb zu gewährleisten, wurden die Bypassraten in den vergangenen Jahren in vielen Fällen erhöht. Abhängig von der Zusammensetzung der Roh- und Brennstoffe kann es vorkommen, dass die anfallenden Bypassstaubmengen aus Qualitätsgründen nicht vollständig dem Zement zugegeben werden können. Daher gilt es, andere Verwertungsmöglichkeiten zu suchen, um eine kostenintensive Deponierung zu vermeiden. Der VDZ hat deshalb die Ad-hoc-Arbeitsgruppe Bypassstaub mit dem Ziel eingesetzt, Möglichkeiten zur Verwertung dieser Stäube außerhalb der Zementherstellung zu untersuchen.

Eine wichtige Voraussetzung für die Verwertung von Bypassstäuben ist die Gleichmäßigkeit der Eigenschaften. Bypassstäube können je nach Ofenbetrieb – z. B. durch schwankende Einträge, Ansatzfall, unterschiedliche Strömungsverhältnisse – schwankende Salzgehalte aufweisen. Um eine Verwertung zu ermöglichen, muss deshalb der Bypassstaub vergleichmäßig werden. **Bild I-15** zeigt zwei Silos, in denen die Umlaufhomogenisierung erfolgt. Während der Chloridgehalt im Bypassstaub vor der Homogenisierung zwischen 1 und 5 M.-% schwankt, liegt der Chloridgehalt im Bypassstaub nach der Homogenisierung bei  $3,6 \pm 0,1$  M.-%.

Als mögliche Verwertungspfade außerhalb der Zementherstellung bieten sich zunächst andere Bauprodukte (z. B. PM-Binder, Tragschichtbinder, Mischbindemittel zur Bodenverfestigung) an. Die für diese Bauprodukte geltenden Normen schreiben jedoch teilweise Begrenzungen hinsichtlich der Zusammensetzung vor. Außerdem wird aus ökologischen Gründen die Frage nach dem Auslaugverhalten insbesondere der Alkaliverbindungen gestellt. Insofern werden die Verwertungsmöglichkeiten von Bypassstäuben in Mischbindemitteln als begrenzt angesehen. Auch ein Einsatz von Bypassstäuben bei der Herstellung von Kalksandsteinen ist aufgrund der enthaltenen Salze und der Gefahr von Ausblühungen begrenzt.



**Bild I-15: Silos zur Umlaufhomogenisierung für Bypassstaub**



Weltweit werden bisher in zwei Zementwerken Anlagen zur Auswaschung der Salze aus Bypassstäuben betrieben. Dabei wird der Bypassstaub (Salzgehalt bis zu 50 M.-%) mit Wasser aufgeschlämmt und in Filterpressen entwässert. Auf diese Weise werden die enthaltenen Salze weitgehend ausgewaschen und der Filterkuchen kann erneut der Ofenanlage zugeführt werden. Die salzhaltigen Wässer müssen neutralisiert und ggf. die darin enthaltenen anorganischen Bestandteile gefällt und ausgefiltert werden. Dieses Verfahren ist bisher aus Kostengründen nur dort anwendbar, wo salzhaltige Wässer umweltverträglich abgeleitet werden können.

Im Forschungsinstitut wurden die Möglichkeiten der Verwertung von Bypassstäuben bei der Glasherstellung untersucht (siehe Kapitel III). Bypassstäube sind aufgrund der in ihnen enthaltenen Alkalien als Rohmaterialsubstitut für die Glasherstellung interessant. Negativ können sich hingegen die enthaltenen Sulfate und Chloride auf die Flüchtigkeit der Alkalien und die Viskosität der Schmelze auswirken und zu einer Blasenbildung bzw. zur Korrosion der Schmelzöfen führen. Erste Schmelzversuche sind sehr vielversprechend. Langzeiterfahrungen mit dem großtechnischen Einsatz von Bypassstäuben bei der Glasherstellung liegen jedoch noch nicht vor.

### Modellierung des Klinkerbrennprozesses

Am Forschungsinstitut der Zementindustrie wird ein verfahrenstechnischer Prozesssimulator zur Berechnung des Klinkerbrennprozesses entwickelt. Das Modell beschreibt nunmehr den gesamten Klinkerbrennprozess von dem Eintrag der Rohmaterialien und der Brennstoffe bis hin zum Austritt des Klinkers aus dem Kühler und dem Ofenabgas aus dem Kamin. Der Fokus liegt hierbei auf den Anlagenkomponenten des so genannten inneren Bilanzraums. Das Modell besteht aus Einzelmodellen für die Zykclone des Vorwärmers, den Calcinator, den Bypass, den Drehrohrofen und den Rost- bzw. Satellitenkühler. Weiterhin wird auch der äußere Bilanzraum über Modelle für den Verdampfungskühler, die Rohmühle, den Vorabscheider und den Staubfilter abgedeckt. Diese Module sind rechnerisch miteinander verknüpft und erlauben es, den stationären Zustand für die gesamte Klinkerproduktionsanlage zu bestimmen. Aufgrund des modularen Aufbaus können somit unterschiedliche Anlagen hinsichtlich der Parameter der einzelnen Anlagenteile, der Anlagenschaltung, der Betriebsweisen sowie der Rohmaterialien

und Brennstoffe individuell und flexibel abgebildet 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 repräsentativ widerspiegeln soll. Davon ausgehend können Betriebseinstellungen geändert, Brennstoffe in ihrer Art und Menge variiert oder ganze Anlagenteile modifiziert werden. Die Berechnungen mit Parametervariationen liefern umfangreiche Informationen zu den interessanten Prozessgrößen für alle Anlagenteile. So werden beispielsweise die Massen- und Volumenströme sowie deren Zusammensetzungen, Gas- und Feststofftemperaturen sowie Wärmeverluste und der spezifische Energiebedarf zum Brennen des Klinkers bestimmt. Die qualitative und quantitative Auswertung der berechneten Daten erfolgt über einen Vergleich mit dem Referenzszenario, wobei immer eine kritische Prüfung hinsichtlich der verfahrenstechnischen Plausibilität erfolgt. 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 der Abluft ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ) als auch hinsichtlich der Klinkerphasen berechnen.

Bei der Nutzung des Modells stehen energetische und stoffliche Fragestellungen im Vordergrund, wobei die Wechselwirkungen innerhalb des Prozesses von besonderem Interesse sind. So wurde das Modell bereits zur Auswahl geeigneter Sekundärbrennstoffe und zur Bewertung der möglichen Einsatzmengen an einer Ofenanlage genutzt. Weiterhin wurde auch der Betrieb eines Teilgasabzugs am Ofenlauf zur Begrenzung von Chlorkreisläufen zwischen Ofen und Vorwärmer mit

dieser Simulationssoftware gerechnet und optimiert. Neben derartigen Studien zum Einsatz von Sekundärbrennstoffen und der Entlastung von Stoffkreisläufen über einen Teilgasabzug können mit relativ geringem Aufwand Parametervariationen durchgeführt werden. Somit können Aussagen zu den Auswirkungen von Anlagenumbauten, z. B. dem Einbau zusätzlicher oder effektiverer Zykclone im Wärmetauscher, sowie denen einer geänderten Betriebsführung, wie beispielsweise der Absenkung der Sinterzonentemperatur, gemacht werden.

So wurde das Modell für die Quantifizierung der Auswirkungen verschiedener Einflussgrößen auf den Brennstoffenergiebedarf des Klinkerbrennens eingesetzt (siehe auch Kapitel I, Energiebedarf). Neben variierenden Rohmaterialfeuchten respektive Zyklostufen, verschiedenen Brennstoffen mit unterschiedlichen Eigenschaften sowie differierenden Bypassraten wurden dabei auch die Anlagengröße und die Klinkerqualität betrachtet. Die berechneten Auswirkungen auf den spezifischen Energiebedarf fasst **Tafel I-3** zusammen. Der mit dem Modell berechnete stationäre Betriebszustand entspricht auf die Praxis übertragen dem Betrieb während eines optimierten Kurzzeit-Leistungstests. Die steinkohle-befeuerte Referenzanlage, die entsprechend des bisherigen BREF (Best Available Techniques Reference Document) definiert wurde, erzielt dabei einen klinkerspezifischen Brennstoffenergiebedarf von etwas mehr als 3000 kJ/kg Klinker. Durch in der Praxis immer auftretenden Betriebsschwankungen erhöht sich dieser Bedarf auf etwa 3180 bis 3340 kJ/kg Klinker. Eine Absenkung des Kalkstandards, eine größere Anlagenkapazität oder der Einsatz einer zusätzlichen Zyklostufe führen im Vergleich zum Referenzszenario zu einer Absenkung des Brennstoffenergiebedarfs. Dagegen erhöht sich der thermische Bedarf bei Einsatz eines Teilgasabzugs zur Entlastung von Stoffkreisläufen, bei Verwendung von Brennstoffen mit ungünstigeren Eigenschaften oder bei Anlagen mit geringerer Produktionskapazität oder feuchteren Rohmaterialien bzw. weniger Zyklostufen.

Eine weitere Simulationsstudie befasst sich mit der Möglichkeit, Betonbrechsand als bereits teilentäuertes Rohmaterialsubstitut einzusetzen (siehe auch Kapitel VI, Nachhaltiges Bauen mit Beton – Verwertung von Brechsand). Neben der hochwertigen Verwertung dieses mineralischen Materials im Kreislauf der Bauwirtschaft werden im Klinkerbrennprozess wertvolle natürliche Ressourcen an Roh- und

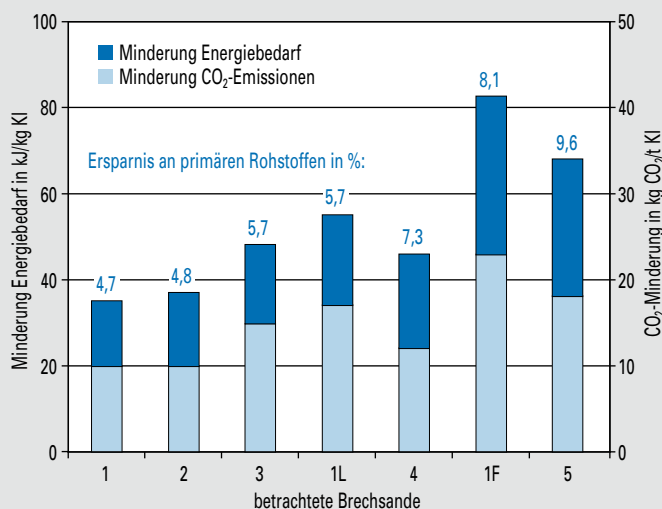
**Tafel I-3: Spezifische Energieverbräuche der Szenarien im Vergleich zur Referenz und als Jahresdurchschnitt**

	spezifischer Brennstoffenergiebedarf in kJ/kg Klinker		
	Leistungstest	Differenz zum Referenzszenario	Jahresdurchschnitt
Referenz	3 026		3 180 bis 3 340
Kalkstandard 94	2 982	-44	3 140 bis 3 300
Ofenkapazität 1 500 t/d	3 239	213	3 400 bis 3 560
Ofenkapazität 5 000 t/d	2 922	-104	3 080 bis 3 240
3 Zyklonstufen	3 272	246	3 430 bis 3 590
4 Zyklonstufen	3 115	89	3 260 bis 3 420
6 Zyklonstufen	2 965	-61	3 120 bis 3 280
5 % Bypassrate	3 054	28	3 210 bis 3 370
10 % Bypassrate	3 080	54	3 240 bis 3 400
15 % Bypassrate	3 106	80	3 270 bis 3 430
100 % Braunkohle	3 122	96	3 280 bis 3 440
40 % Substitution	PL	3 122	96
	RG	3 153	127
70 % Substitution	PL	3 235	209
	RG	3 310	284
100 % Substitution	PL	3 355	329
	RG	3 469	443

PL: konstante Produktionsleistung  
 RG: konstanter Rohgasvolumenstrom

Brennstoffen geschont sowie Emissionen des klimarelevanten Gases CO<sub>2</sub> gemindert. Die bisher durchgeführten Berechnungen ergeben standortabhängig mögliche Rohmaterialeinsparungen von bis zu 10 M.-% des ursprünglichen Rohmaterials, wobei bedingt durch den hohen Siliziumanteil im Brechsand hauptsächlich Sand, in geringem Umfang jedoch auch Calciumträger substituiert werden können. Weiterhin können, wie in **Bild I-16** dargestellt, der thermische Energiebedarf sowie die CO<sub>2</sub>-Emission um bis zu 3 % bzw. etwa 80 kJ/kg Klinker und mehr als 20 kg CO<sub>2</sub>/t Klinker vermindert werden. Bei den Studien wurde dabei darauf geachtet, dass sich die verfahrens- und betriebstechnischen Prozessgrößen sowie insbesondere die Klinkerqualität im Vergleich zum Referenzszenario ohne Brechsandeinsatz nur in akzeptablen Grenzen verändern.

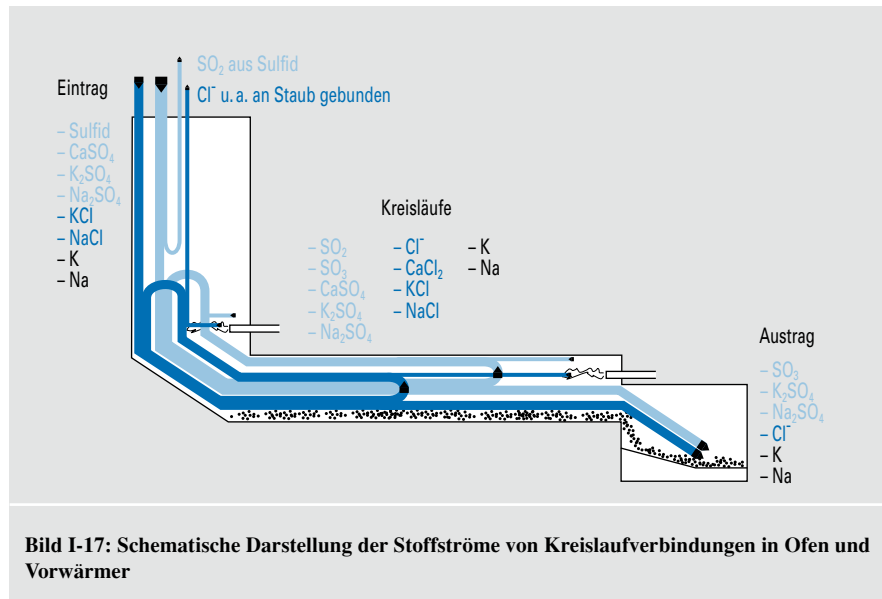
Von besonderem Interesse ist bei einem Brennstoffwechsel oder bei dem Einsatz von Rohmaterialsubstituten oftmals der damit verbundene geänderte Eintrag von Chlor in die Anlage. Chlor bildet zusammen mit Schwefel und Alkalien Kreisläufe zwischen dem Drehrohrofen und den unteren Stufen des Vorwärmers bzw. 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. Im Rahmen einer Simulationsstudie wurde der Betrieb einer modernen Drehofenanlage mit zunächst ausschließlich Braunkohlensstaubeinsatz und im Vergleich dazu mit Einsatz verschiedener Sekundärbrennstoffe untersucht. Der Chloreintrag in den Prozess wurde durch diese Brennstoffwechsel von etwa 90 auf über 900 mg/kg Klinker verzehnfacht. In der Folge erhöhten sich auch die Chlorgehalte in den Heißmehlen deutlich. Im Ofeneinlaufmehl stieg der Gehalt von etwa 0,6 M.-% Cl<sup>-</sup> auf sowohl in der Praxis als auch vom Modell nicht beherrschbare Gehalte von deutlich mehr



**Bild I-16:**  
 Minderungspotenziale durch Einsatz verschiedener Betonbrechsande

als 6 M.-% an. In den Berechnungen wurde daher ein Teilgasabzug am Ofeneinlauf berücksichtigt. Diese Kreislaufentlastung führte zu Heißmehlgehalten unter 1,5 M.-% Cl bei Bypassraten kleiner 5 %, bezogen auf den Ofeneinlaufvolumenstrom. Der Brennstoffenergiebedarf erhöhte sich durch den Brennstoffwechsel und den Bypassbetrieb um bis zu 150 kJ/kg Klinker, insbesondere bedingt durch erhöhte Rohgasvolumenströme, höhere Temperaturen im Ofeneinlauf und Wärmetauscher, gestiegene Wandwärmeverluste sowie den Energiestrom des Bypassgases. Der Anteil der Hauptfeuerung an der Gesamtfeuerungswärmeleistung musste von etwa 44 % auf bis zu 66 % angehoben werden. Entsprechend musste der Energieeintrag über den Calcinator von etwa 56 % auf bis zu 34 % reduziert werden.

Zur Abbildung dieser Stoffkreisläufe umfasst das Modell die Elemente Schwefel (in Form des wenig flüchtigen Sulfats und des flüchtigen Sulfids), Chlor und Alkalien in Form von kreislaufbildenden chemischen Verbindungen  $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $KCl$ ,  $NaCl$ ,  $K_2SO_4$ ,  $Na_2SO_4$ ,  $CaSO_4$  und  $CaCl_2$ . Diese Verbindungen werden entweder in dieser Form bereits mit den Rohstoffen und Brennstoffaschen in den Prozess eingetragen oder sie können sich im Prozess bilden, wobei die Bildungsprozesse nur bei entsprechend der Praxis 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. 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. **Bild I-17** zeigt schematisch die Stoffströme von Kreislaufverbindungen im Ofen und im Vorwärmer.



### Modellierung der Vorgänge im Calcinator

Die heutigen Anforderungen an die Zementhersteller forcieren Weiterentwicklungen in den Bereichen Einhaltung der Emissionsgrenzwerte, Verringerung der Betriebskosten, höchstmögliche Produktionsflexibilität, minimale Wartung und geringer spezifischer Wärme- und Energieverbrauch bei höchster Ofenverfügbarkeit.

Die Möglichkeit einer weitgehend abgesicherten Simulation der Vorgänge im Calcinator vereinfacht die gezielte betriebliche Optimierung und kann den Anteil zeit- und kostenintensiver Experimente an laufenden Ofenanlagen verringern. Darüber hinaus lassen sich leichter fundierte Aussagen über die technische Realisierbarkeit gestufter Calcinatorfeuerungen zur Schadstoffminderung an vorhandenen Altanlagen 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.

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 begleitete das FIZ ein von der AiF gefördertes Simulationsprojekt. Ziel dieses Projekts ist es, die betriebstechnische Optimierung von Vorcalciniernanlagen hinsichtlich Schadstoffbildung,  $NO_x$ -Reduktionsmaßnahmen und – ggf. zukünftig – Ansatzbildung durch

numerische Simulation zu unterstützen. Dazu wurde das vorhandene, in verschiedenen Bereichen der Anlagensimulation bereits eingesetzte Detailwissen zusammengeführt, hinsichtlich der Gültigkeitsbereiche überprüft und an die speziellen Bedingungen von Calcinatorfeuerungen angepasst.

Im Forschungsvorhaben wurden die Einzelprozesse Brennstoffabbrand,  $NO_x$ -Bildung, Entsäuerungs- und Calciniervorgang, Turbulenzmodulation und Strahlungsbeeinflussung unter ausschließlicher Betrachtung von Kohle als Brennstoff erfolgreich modelliert und durch Messergebnisse des Forschungsinstituts der Zementindustrie von realen Zementanlagen validiert. Unter Berücksichtigung der Komplexität des Zementherstellungsprozesses und der Schwierigkeit der messtechnischen Erfassung lokaler Größen im Calcinator konnte dabei eine sehr gute Übereinstimmung der errechneten Größen mit experimentellen Werten erreicht werden.

Der LUAT hat sich dabei im Wesentlichen auf die Beschreibung von Strahlung und Turbulenz unter den Randbedingungen von Vorcalciniern konzentriert. Kennzeichnend für Vorcalciniern ist die hohe Partikelbeladung, die durchschnittlich ca. 1,5 kg Feststoff/kg Gas beträgt. Diese hohe Beladung hat direkte Auswirkungen auf die Turbulenz- und Strahlungsmodellierung. Bei den relativ feinen Kohle- und Kalkmehlparkeln erfolgt ein Übergang der kinetischen Turbulenzenergie aus den Turbulenzwirbeln der Gasphase in kinetische Energie der Partikelphase. Auf diese Weise wird der Gasphase Turbulenz entzogen,

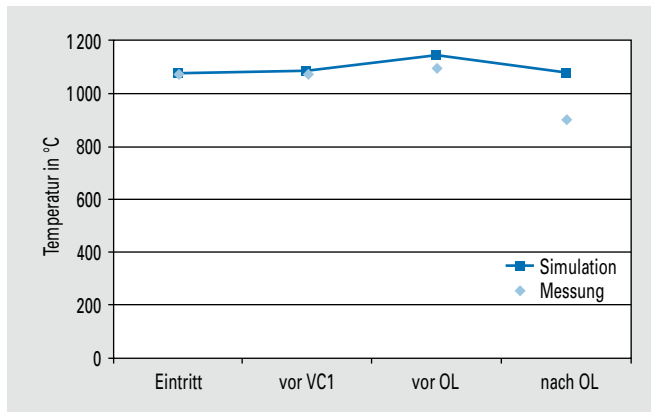


Bild I-18: Vergleich gemessener und berechneter Temperatur

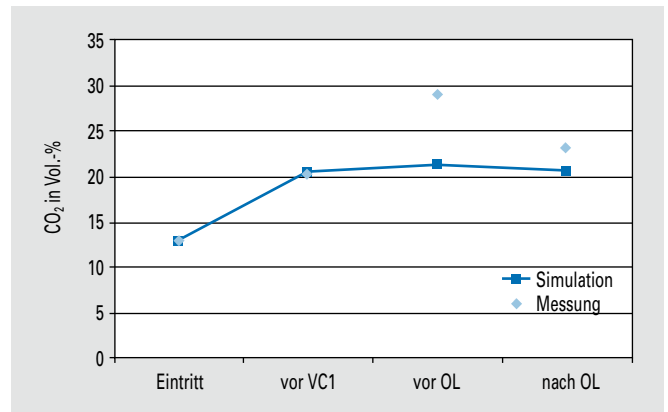
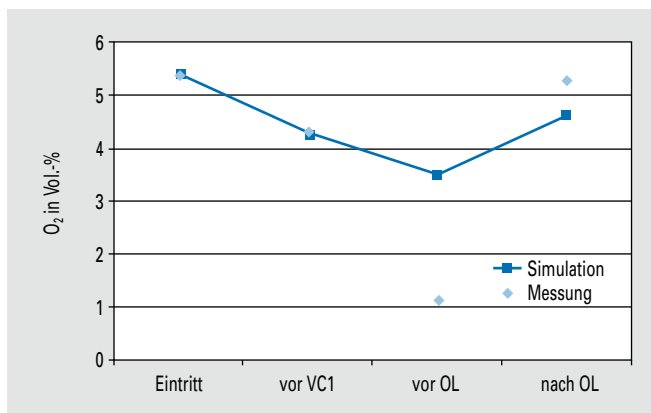
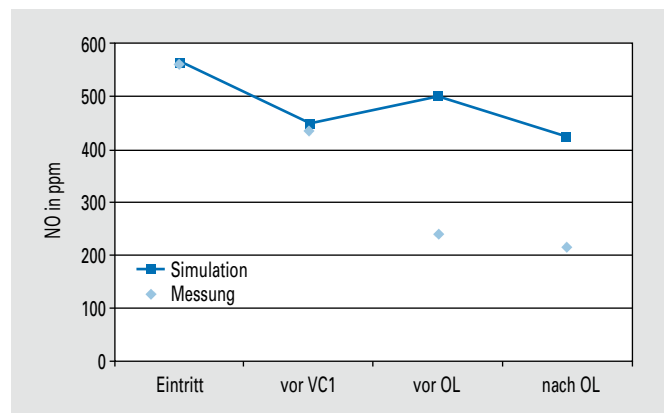
Bild I-19: Vergleich gemessener und berechneter CO<sub>2</sub>-KonzentrationenBild I-20: Vergleich gemessener und berechneter O<sub>2</sub>-Konzentrationen

Bild I-21: Vergleich gemessener und berechneter NO-Konzentrationen

diese geht in die Partikelphase über. Hierzu wurde ein bestehendes Modell derartig modifiziert, dass die vorgenannten Effekte gezielter beschrieben werden können.

Der Einfluss der Partikel auf den Strahlungswärmeaustausch bei den im Calcinator vorliegenden hohen Beladungen besteht darin, dass mit zunehmender Gasbeladung die Festkörperstrahlung zwischen räumlich nah beieinander liegenden Partikeln gegenüber der Gasstrahlung einen größeren Anteil am Strahlungswärmeaustausch hat. Bei entsprechend hoher optischer Dichte der Zweiphasen-Strömung erfolgt der Strahlungswärmeaustausch in der Strömung in hohem Maße durch Festkörperstrahlung zwischen räumlich nahen Partikeln, die Gasstrahlung verliert an Bedeutung. Zusätzlich treten an den Partikeln Streueffekte auf, die in Stärke und Richtungsabhängigkeit der Streuung von Größe, Material, Gestalt und Oberfläche der Einzelpartikel abhängen. Zur Berücksichtigung dieser Effekte wurde wiederum ein ursprünglich aus der Kraftwerkstechnik stammendes Modell an die

Verhältnisse im Voralcalinator angepasst und weiterentwickelt. Zur Anpassung und Validierung der Teilmodelle dienen die Versuchsergebnisse des FIZ, die während der Betriebsmessungen an KHD- und Polysius-Calcinatoren erzielt wurden. Diese Ergebnisse wurden im Rahmen des AIF-Forschungsvorhaben 12699 N erzielt.

Am LEAT wurden die Modelle zur Calciniierung und Sulfatierung der Mehlpartikel, zum Brennstoffabbau und zur NO<sub>x</sub>-Bildung implementiert und erfolgreich verbessert.

Die Modelle zur Simulation der Calciniierungs- und Sulfatierungsreaktion wurden erweitert und berücksichtigen nun auch den transienten Verlauf der Porosität des Kalksteinmehls und der für die Reaktionen zur Verfügung stehenden spezifischen inneren Oberfläche. Dadurch kann der Verlauf der Calciniierungsreaktion exakter abgebildet werden. Weiterhin wird auch die Bildung einer Sulfatschicht mit geringer Porosität durch die Sulfatierungsreaktion modelliert. Dadurch wird auch die Zunahme des

Porendiffusionswiderstands und damit die Abnahme der Reaktionsgeschwindigkeit der Calciniierung durch das Modell wiedergegeben.

Verschiedene Modelle für die Beschreibung der NO<sub>x</sub>-Entstehung und Reduktion im Calcinator wurden ebenso untersucht. Die Problemstellung lässt sich in drei Teilbereiche untergliedern: die Freisetzung des Brennstoffstickstoffs, die Gasphasenreaktionen der N-Verbindungen und den Einfluss heterogener Reaktionen an den Oberflächen der Mehlpartikel. Für die Freisetzung von Brennstoffstickstoff aus Kohle wurden detaillierte Pyrolysemodelle verwendet, mit denen die Verteilung des Brennstoffstickstoffs auf flüchtige und Koks sowie die Freisetzung während der Pyrolyse als HCN und NH<sub>3</sub> in einem vorgeschalteten Schritt bestimmt wurde. Für die Gasphasenreaktionen wurden mehrere globalkinetische NO<sub>x</sub>-Modelle getestet und mit experimentellen Ergebnissen von Laborversuchen verglichen. Darauf aufbauend wurde ein globalkinetisches Modell in das CFD-Programm integriert,

welches sowohl die Entstehung von  $\text{NO}_x$  als auch dessen Reduktion, wie sie unter Calcinatorbedingungen abläuft, beschreibt. Das Modell wurde wiederum anhand der vorgenannten FIZ-Messergebnisse validiert. In den **Bildern I-18 bis I-21** sind beispielhaft für eine Ofenanlage die berechneten Temperaturen, die  $\text{CO}_2$ -,  $\text{O}_2$ - und  $\text{NO}$ -Konzentrationen im Vergleich mit Messwerten, die vom FIZ im Rahmen von Betriebsversuchen ermittelt wurden, dargestellt. Bei den Punkten handelt es sich um Mittelwerte. Die berechneten Werte zeigen eine qualitativ und quantitativ gute Übereinstimmung mit den Verläufen der Messdaten an den Messstellen Calcinatoreintritt, vor VC-Brenner, vor der Oberluftzufuhr („OL“) und nach der Oberluftzufuhr. Die Abweichungen (insbesondere bei  $\text{NO}$ ) im Bereich der reduzierenden Zone vor der Oberluft folgen aus noch vorhandenen Ungenauigkeiten des Reaktionssystems. Diese sind Gegenstand weiterführender Forschung. Insgesamt kann das Verhalten des Prozesses in der Simulation richtig abgebildet werden und die Einflüsse der Randbedingungen auf den Betrieb werden deutlich.

Der Einfluss der heterogenen Reaktionen an den Rohmehloberflächen wurde ebenfalls betrachtet und durch ein Submodell, welches für die Simulation von Wirbelschichtfeuerungen entwickelt wurde, in den Berechnungen berücksichtigt.

Im Rahmen dieses AiF-Projekts konnten somit die Kenntnisse bezüglich der CFD-Simulation von Vorcalcinatoren erweitert sowie calcinatorspezifische Teilmodelle (Entsäuerungs- und Sulfatierungsvorgang, Turbulenzmodulation, Strahlungswärmeaustausch, Kohleabbrand,  $\text{NO}_x$ -Bildung) entwickelt, in die CFD-Codes integriert und validiert werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen des AiF-Projekts soll in einem weiteren beantragten Forschungsvorhaben nunmehr der Ersatz von Kohle durch Sekundärbrennstoffe mittels CFD-Methoden untersucht werden. Ziel ist es, die Möglichkeiten zur Verwendung von Sekundärbrennstoffen in Vorcalcineranlagen zu erweitern und damit einen wichtigen Beitrag zur Erhaltung der Konkurrenzfähigkeit der deutschen Zementindustrie zu leisten. Weiterhin sollen die Betreiber von Vorcalcineranlagen in die Lage versetzt werden, die Sekundärbrennstoffe gezielt zur  $\text{NO}_x$ -Minderung (z. B. bei der Stufenverbrennung) einzusetzen und damit Kosten für sekundäre Minderungsmaßnahmen herabzusetzen.



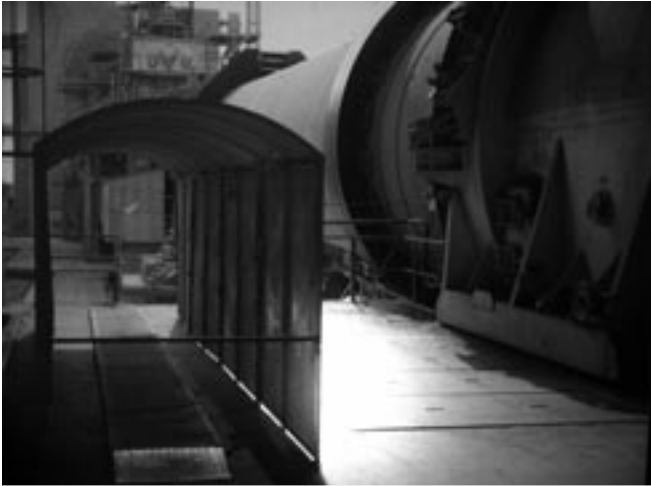
**Bild I-22:**  
Abgelöste  
Ausmauerung  
aufgrund eines  
unzureichenden  
Dehnfugenspiels

### Feuerfeste Materialien

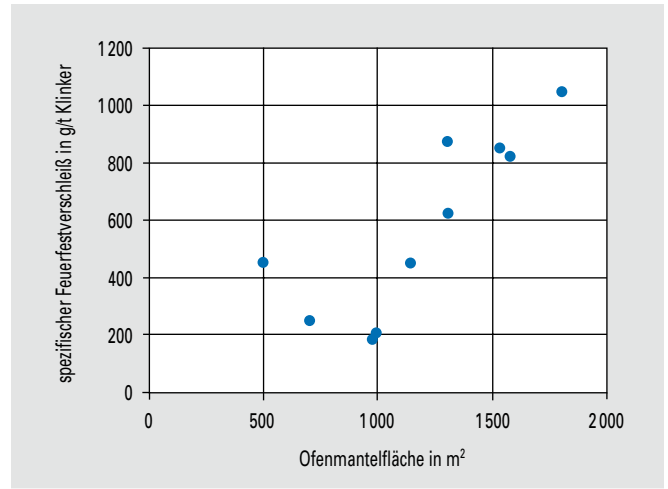
In den vergangenen Jahren ist das in den Zementwerken verfügbare Know-how bezüglich des Einsatzes feuerfester Materialien mehr und mehr zurückgegangen. Deshalb wurde der Arbeitskreis „Feuerfeste Materialien“ gegründet, um den aktuellen Kenntnisstand auf diesem Gebiet in einem Merkblatt zusammenzufassen.

Zur Gewährleistung einer hohen Betriebssicherheit der Ofenanlagen und zur Planung von Ofenreparaturen ist es unerlässlich, über den Zustand des Feuerfestmaterials informiert zu sein. Dabei ist zwischen der Beurteilung des Feuerfestzustands von außen im laufenden Betrieb und der Zustandsdiagnose von innen durch eine Begehung zu unterscheiden. Für die Zustandsdiagnose von außen bietet sich die laufende Kontrolle der Ofenmanteltemperatur durch Erfassung der Infrarotstrahlung an. Hierfür stehen am Markt leistungsfähige automatische Erfassungs- und Auswertesysteme zur Verfügung. Die Auswertung der maximalen, mittleren und minimalen Ofenwandtemperatur ermöglicht Aussagen über die Futter- und Ansatzverhältnisse. Anhand der Geschwindigkeit, mit der sich die Temperaturen ändern, lässt sich die weitere Entwicklung abschätzen.

Zur Bestimmung der Reststeinstärke während eines Ofenstillstands können sowohl zerstörungsfreie Verfahren angewendet werden als auch Bohrungen oder das Ausstemmen von Fenstern durchgeführt werden. Erfahrungen zeigen, dass von zerstörungsfreien Messgeräten keine zuverlässigen Messsignale geliefert werden. Durch Bohren mit einem Steinbohrer (8 bis 10 mm) lassen sich die Reststeinstärken genau ermitteln, allerdings werden Steinschädigungen (Rissbildung, Alkaliinfiltration) nicht erkannt. Deshalb sollte der Zustand des Feuerfestmaterials an kritischen Stellen durch Kernbohrungen oder das Ausstemmen von Fenstern untersucht werden, sodass anhand der Bohrkerne oder freiliegenden Steine der Zustand genau beurteilt werden kann. Bei niedriger Reststeinhöhe lässt sich das Mauerwerk bei dieser Methode jedoch nicht wieder dauerhaft verschließen. Die Lebensdauer von Feuerfestmaterialien wird von einer Vielzahl von Einflussfaktoren beeinflusst, insbesondere durch die lokal vorliegenden mechanischen, thermischen und chemischen Beanspruchungen. Übermäßige mechanische Beanspruchungen können zu Abplatzungen, Ablösungen (**Bild I-22**), konzentrischer Rissbildung, spiralförmigen Verdrehungen einzelner Steinringe, Aus-



**Bild I-23:** Schutzunnel zur Sicherung des Transportwegs vor herabfallenden Ansatzstücken



**Bild I-24:** Spezifischer Feuerfestverschleiß von Drehofenanlagen in Abhängigkeit von der Ofenmantelfläche

brüchen im Lauftringbereich oder zu Axialfurchen führen. Ursachen hierfür sind in der Regel in der Qualität der Zustellung (zu lockerer oder zu fester Einbau) oder in erhöhter Ofenovalität zu suchen. Thermische Überhitzung infolge fehlendem Ansatz oder direktem Kontakt mit der Flamme kann zu Schmelzerscheinungen, Schmelzinfiltration oder Rekristallisation und somit zur Schwächung der Steinstruktur führen. Temperaturschock z. B. infolge wechselnder Ansatzverhältnisse oder zu schnellem Aufheizen kann zu Abplatzungen führen. Chemischer Verschleiß infolge Alkaliinfiltration, Chromerzkorrosion oder zeitweise reduzierender Atmosphäre führt zu Rissbildung und Gefügezerrüttung. In diesem Fall sollte die Auswahl der Steinqualitäten überdacht werden.

Durch eine richtige Installation der feuerfesten Ausmauerung können einige mechanische Belastungen verringert und so ein vorzeitiger Verschleiß ausgeschlossen werden. Insbesondere ist bei der Verlegung der feuerfesten Steine das richtige Dehnfugenspiel und die Verringerung der Ofenmantelovalität von herausragender Bedeutung. Außerhalb des Drehofens werden unterschiedliche Konstruktionen des Feuerfestaufbaus gewählt. Bauteile mit erhöhten Korrosionserscheinungen sind z. B. Decken der unteren Zykclone, Abtragflansche, Hängedecken im vorderen Bereich von Rostkühlern und die Feuerfestummantelung von Brennern. Hierfür werden je nach Bauteil unterschiedliche Konstruktionen gewählt.

Arbeiten am Feuerfestmaterial zählen zu denjenigen mit dem höchsten Gefährdungspotenzial im Zementwerk. Deshalb sollten die Mitarbeiter vor Beginn von

Feuerfestarbeiten unterwiesen und auf die spezifischen Gefährdungen bei Feuerfestarbeiten hingewiesen werden. Bezüglich Arbeitssicherheit sind unterschiedliche Maßnahmen bei Arbeiten im Drehofen und im Wärmetauscher erforderlich. Während im Drehofen vorwiegend Sicherheitsmaßnahmen bei Ansatzentfernung und Ausbruch sowie die Sicherung des Fahrwegs (Bild I-23) zu berücksichtigen sind, spielen im Wärmetauscher neben der Ansatzentfernung insbesondere Fragen des Baus von Bühnen, Gerüsten und Schutzdecken eine entscheidende Rolle.

Bei Trocknungs- und Aufheizprozeduren ist zu unterscheiden, ob eine komplett neu zugestellte Ofenanlage aufzuheizen ist oder ob nur feuerfeste Steine in Teilbereichen des Drehofens ausgetauscht wurden.

Die Erfahrungen von zehn verschiedenen Ofenanlagen bezüglich des spezifischen Feuerfestverschleißes (in g/t Klinker – Mittelwert der letzten fünf Jahre) zeigen, dass die Zahl der Laufringe und der Ofendurchmesser offenbar einen großen Einfluss auf den spezifischen Feuerfestverschleiß haben. Dagegen konnte kein Zusammenhang zwischen dem spezifischen Feuerfestverschleiß und der spezifischen Sinterzonenbelastung festgestellt werden. Untersucht wurde auch der Zusammenhang zwischen mittlerem Chlorgehalt im Heißmehl und spezifischem Feuerfestverbrauch. Hier zeigte sich zwar eine gewisse Korrelation, ein eindeutiger Zusammenhang lässt sich jedoch nicht ableiten. Die beste Korrelation wurde jedoch zwischen der Ofenmantelfläche und dem spezifischen Feuerfestverbrauch festgestellt (Bild I-24). Die Untersuchungen sollen unter Einbeziehungen weiterer Ofenanlagen weitergeführt werden.

### Einfluss des Mahlsystems auf die Zementeigenschaften

Die Einflüsse von Feinheit und Korngrößenverteilung des Zements auf dessen Eigenschaften sind seit langem bekannt. Ebenso ist bekannt, dass verschiedene Mahlsysteme Zemente mit unterschiedlichen Steigungsmaßen der Korngrößenverteilungen erzeugen. Bei einer Reihe neuerer Untersuchungen diverser Autoren wurden aber auch unterschiedliche Eigenschaften von Zementen festgestellt, die auf verschiedenen Mahlsystemen hergestellt wurden – obwohl die Zemente nahezu gleiche Korngrößenverteilungen aufwiesen. Die beobachteten Unterschiede können entweder auf unterschiedliche Mühlenatmosphären oder auf verschiedene Zerkleinerungsmechanismen zurückgeführt werden.

Die hauptsächlich in der Zementindustrie verwendeten Mahlaggregate Vertikal-Wälzmühle, Gutbett-Walzenmühle und Kugelmühle unterscheiden sich wesentlich in den Zerkleinerungsmechanismen. Während Gutbett-Walzenmühlen hauptsächlich durch Druck zerkleinern, herrscht bei Vertikal-Wälzmühlen eine gekoppelte Druck- und Reibzerkleinerung vor. Kugelmühlen zerkleinern durch eine Mischbeanspruchungen von Druck, Reibung und Schlag.

Um die Einflüsse des Zerkleinerungsmechanismus und damit des Mahlsystems zu untersuchen, wurden im Rahmen des AiF-Forschungsvorhabens 14025N zwei Klinker (im Folgenden: Herkunft A und B) und drei Hüttensande (Herkunft A, B und C) auf verschiedenen halbertechnischen Mahlanlagen auf je zwei Feinheitsniveaus (3000 und 4000 cm<sup>2</sup>/g nach Blaine) ge-

mahlen. Ziel war es, vergleichbare Korngrößenverteilungen für die Mehle einer Herkunft und eines Feinheitsniveaus zu erzeugen. Anschließend wurden aus den Mehlen Zemente hergestellt und deren Eigenschaften wie Festigkeiten, Wasseranspruch, Erstarrungsverhalten und Kornform geprüft.

Die Untersuchungen wurden in Zusammenarbeit mit der Gebr. Pfeiffer AG und von KHD Humboldt Wedag an Technikumanlagen durchgeführt. Die verwendete halbtechnische Vertikal-Wälzmühle der Gebr. Pfeiffer AG (**Bild I-25**) besitzt einen Mahltellerdurchmesser von 35 cm und einen integrierten Stabkorbsichter. Der Durchsatz der Anlage lag bei den Versuchen zwischen 150 und 210 kg/h. Die Durchsätze der eingesetzten halbtechnische Gutbett-Walzenmühle der Firma KHD Humboldt Wedag (**Bild I-26**) lagen zwischen 300 und 700 kg/h je nach Material und Feinheit. Diese Mahlanlage besteht aus einer Walzenpresse, einem VSK-Sichter und einem Transportring, der die erzeugten Schülpen zur Aufgabe des Sichters fördert. Die verwendete Umlaufmahlanlage mit Kugelmühlen und Sichter befindet sich im FIZ (**Bild I-27**). Um mit der Kugelmühle vergleichbare Korngrößenverteilungen wie mit den anderen Mahlsystemen herstellen zu können, musste die Kugelmühle mit hohen Umlaufmassenströmen betrieben werden. Dementsprechend wurden bei Durchsätzen von 13 bis 25 kg/h Umlaufmassenströme von bis zu 400 kg/h eingestellt.

In **Bild I-28** sind die Korngrößenverteilungen der Klinkermehle der Herkunft B bei einer Feinheit von 3000 cm<sup>2</sup>/g nach Blaine dargestellt, die mit der Gutbett-Walzenmühle (GWM), der Vertikal-Wälzmühle

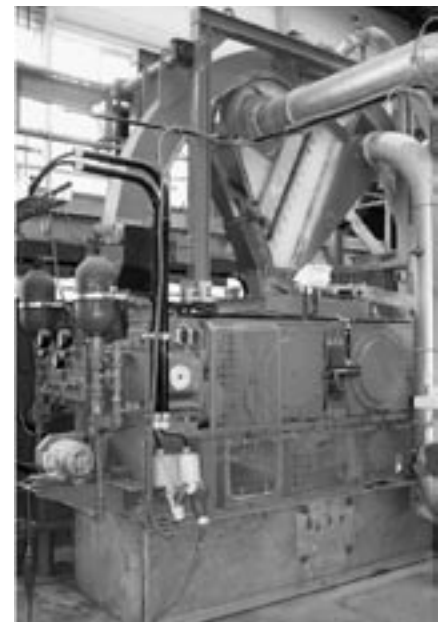
(VWM) sowie der Kugelmühle (KM) gemahlen wurden. Es wird deutlich, dass es durch entsprechende mahltechnische Maßnahmen (z. B. ungewöhnlich hohe Anpressdrücke bei GWM und VWM bzw. hohe Umlaufzahlen bei KM) möglich war, nahezu identische Korngrößenverteilungen zu erzielen. Auch bei den anderen Feinheitsniveaus bzw. dem anderen Feinheitsniveau ist es bei fast allen Mahlversuchen durch entsprechende Einstellungen der Anlagenparameter gelungen, Mehle mit nahezu identischer Korngrößenverteilung herzustellen.

Für Eigenschaftsuntersuchungen wurden die Klinkermehle durch Zugabe von Anhydrit und Halbhydrat auf einen Gesamt-SO<sub>3</sub>-Gehalt von 3 % eingestellt. Zunächst wurde der Wasseranspruch bei Normsteife und am Sättigungspunkt sowie das Erstarrungsverhalten geprüft. Innerhalb einer Gruppe des gleichen Ausgangsstoffs und der gleichen Feinheit konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen eingesetzten Mahlsystemen festgestellt werden.

Die Festigkeitsprüfungen wurden an Mörtelprismen nach DIN EN 196 durchgeführt. Alle Prüfungen wurden dreimal wiederholt, um die Ergebnisse abzusichern. Bei beiden Klinkern und beiden Feinheitsniveaus zeigten die auf der Gutbett-Walzenmühle hergestellten Mehle nach zwei Tagen höhere Druckfestigkeiten als die jeweiligen auf den anderen Mahlsystemen gemahlene Klinkermehle. Die Festigkeitswerte der auf der Vertikal-Wälzmühle und der Kugelmühle hergestellten Klinkermehle waren dagegen vergleichbar. Nach 7 bzw. 28 Tagen unterschieden sich die Festigkeitswerte der auf der Gutbett-Walzenmühle hergestellten Klinkermehle jedoch nicht



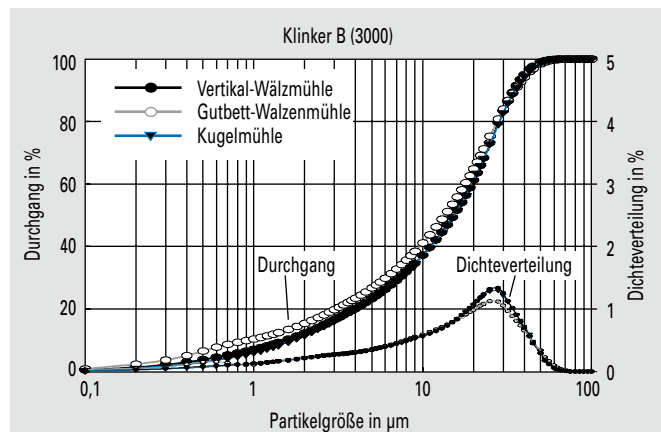
**Bild I-25:** Halbtechnische Vertikal-Wälzmühle der Gebr. Pfeiffer AG



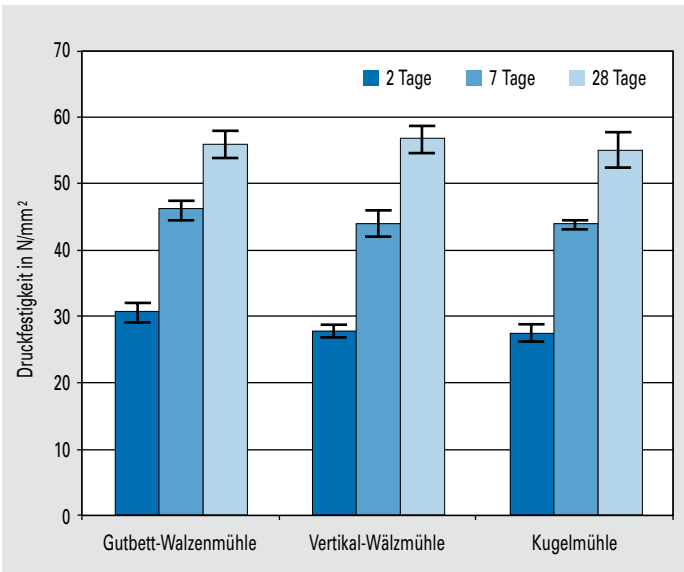
**Bild I-26:** Halbtechnische Gutbett-Walzenmühle von KHD Humboldt Wedag



**Bild I-27:** Halbtechnische Kugelmühle des FIZ



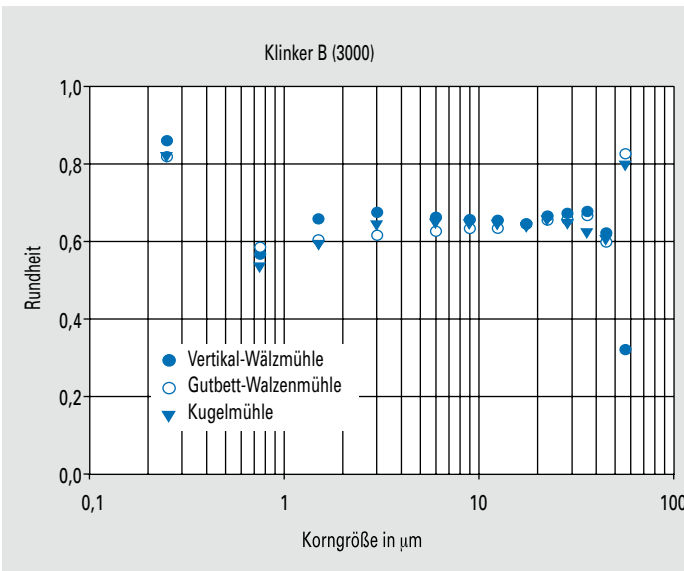
**Bild I-28:** Korngrößenverteilungen des Klinker B bei einer Feinheit von 3000 cm<sup>2</sup>/g nach Blaine



**Bild I-29:**  
Druckfestigkeiten der Klinker B 3000

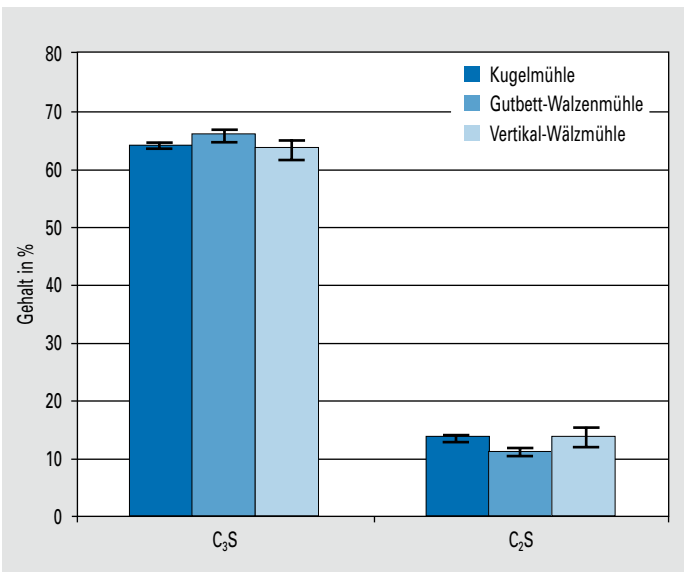
mehr von denen der anderen beiden Mahl-systeme. Beispielhaft sind die Druckfestigkeiten des Klinkers B mit einer Feinheit von 3000 cm<sup>2</sup>/g in **Bild I-29** dargestellt. Weiterhin wurden Betonuntersuchungen durchgeführt, um die Ergebnisse aus den Mörteluntersuchungen zu bestätigen. Diese Versuche zeigten allerdings keine Unterschiede in den Druckfestigkeiten nach zwei Tagen zwischen den drei Mahl-systemen. Ursache hierfür ist wahrscheinlich der bei den Betonuntersuchungen im Vergleich zu den Mörtelprüfungen deutlich geringere Zementanteil von 330 kg Zement/m<sup>3</sup> Beton.

Die Hüttensandmehle wurden mit zwei unterschiedlichen CEM I-Zementen (im Verhältnis 70 % Hüttensand zu 30 % CEM I-Zement) sowie Sulfatträgern gemischt und ebenfalls auf ihre Festigkeitseigenschaften untersucht. Alle drei Hüttensande zeigten unabhängig von dem beigemischt CEM I-Zement keine signifikanten Zusammenhänge zwischen dem eingesetzten Mahl-system und dem erzielten Festigkeitsniveau.



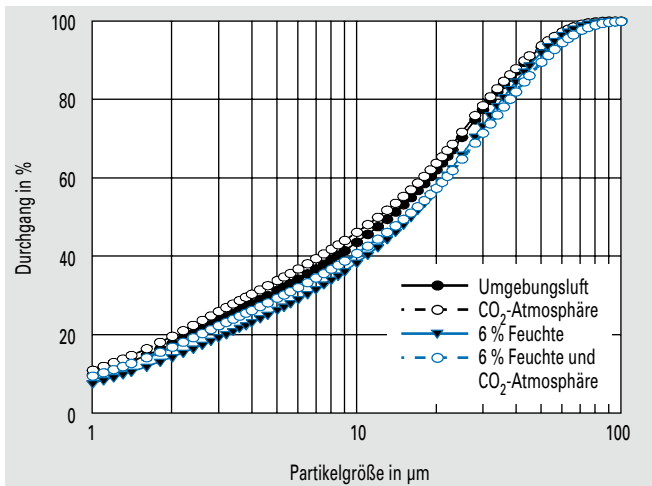
**Bild I-30:** Rundheitsverteilung der Klinker-mehle der Feinheit 3000 und der Herkunft B

Die Kornformen der entstandenen Mehlpartikel wurden mit zwei unterschiedlichen Analysatoren untersucht. Zum Einsatz kamen Kornformanalysatoren der Firma Malvern und der Firma Occhio. Für die Kornformmessungen wurden Streupräparate hergestellt und mit einer hochauflösenden Kamera jeweils 25 000 Einzelpartikel aufgenommen und ausgewertet. Die Kornformparameter wurden für einzelne Kornfraktionen als Mittelwerte aller in der Kornklasse enthaltenen Partikel bestimmt und über der mittleren Korngröße der Fraktion dargestellt. Die Ergebnisse der mittleren Rundheitsverteilung des Klinkers B 3000 sind in **Bild I-30** exemplarisch dargestellt. Die Mehle, die auf den unterschiedlichen Mahl-systemen hergestellt wurden, zeigen vergleichbare Kornformparameter für die Partikel aller Kornklassen. Vergleichbare Ergebnisse wurden auch bei den Kornformmessungen der Mehle eines anderen Feinheitsniveaus bzw. einer anderen Herkunft erzielt, die mit den genannten unterschiedlichen Mahl-systemen erzeugt wurden. Auch mit dem anderen verwendeten Messgerät wurden keine signifikanten Unterschiede bezüglich der erzeugten Kornform zwischen den Mahl-systemen festgestellt.

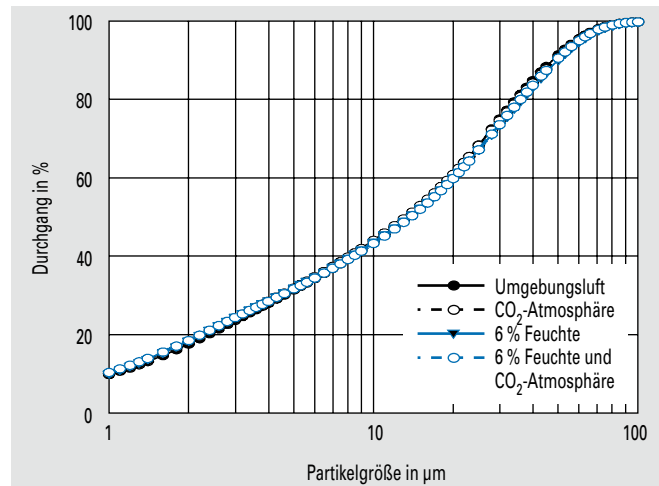


**Bild I-31:** Phasengehalte der Fraktion < 20 µm der Klinker B 3000





**Bild I-32:** Partikelgrößenverteilungen der Hüttensande mit gleicher spezifischer Oberfläche



**Bild I-33:** Partikelgrößenverteilungen der Hüttensande mit vergleichbarer KGV

An den hergestellten Mehlen wurden außerdem verschiedene chemisch-mineralogische Untersuchungen durchgeführt. Die Klinkermehle wurden mittels Siebung und mithilfe eines Labor-Hochleistungssichters fraktioniert und die Klinkerphasengehalte der einzelnen Fraktionen mittels Rietveld-Verfeinerung der Röntgendiffraktometrie bestimmt. Dabei zeigte sich, dass die mit der Gutbett-Walzenmühle erzeugten Klinkermehle gegenüber den mit anderen Mahlsystemen hergestellten Mehlen erhöhte  $C_3S$ -Gehalte in der Fraktion  $< 20 \mu\text{m}$  aufwiesen (**Bild I-31**). Die Anreicherung von  $C_3S$  in der Fraktion  $< 20 \mu\text{m}$  wurde bei beiden Klinkern festgestellt.

Weiterhin wurde die Hydratationswärme der verschiedenen Klinkerfraktionen in den ersten 72 Stunden untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Partikelgröße und der Wärmeabgabe. Je kleiner die Zementpartikel sind, desto größer ist die spezifische Oberfläche und desto höher ist die Hydratationswärme. Dagegen unterschieden sich die Hydratationswärmen der mit unterschiedlichen Mahlsystemen hergestellten Klinkermehle in den jeweiligen Fraktionen nicht signifikant.

Die Hüttensande wurden ebenfalls mittels Siebung und Sichtung fraktioniert und anschließend analysiert. Dabei wurden die Mehlsproben mit der Simultanen Thermanalyse, der Hochtemperatur-Röntgendiffraktometrie sowie der Kathodolumineszenz-Mikroskopie untersucht. Keine der angewendeten Analysemethoden zeigte signifikante Unterschiede für die auf den drei unterschiedlichen Mahlsystemen hergestellten Hüttensandmehle.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Mahlsystem keinen signifikanten Einfluss auf die Eigenschaften von Hochofenzementen hat. Bei der Herstellung von Portlandzementen weisen die auf der Gutbett-Walzenmühle hergestellten Klinkermehle bei Mörtelprismen geringfügig höhere Druckfestigkeiten auf als die Klinkermehle, die mit einer Kugelmühle oder einer Vertikal-Wälzmühle gemahlen wurden. Die Festigkeitswerte zu späteren Prüfterminen unterschieden sich bei den drei Mahlsystemen nicht signifikant.

#### Einfluss der Mühlenatmosphäre auf die Eigenschaften von hüttensandhaltigen Zementen

Hüttensand weist je nach Herstell- und Lagerbedingungen Feuchtegehalte zwischen 6 und 12 % auf. Für die Zementherstellung muss der Hüttensand entweder vor oder während der Mahlung getrocknet werden. Für die Trocknung bietet sich im Zementwerk die Nutzung von Ofenabgas oder Kühlerabluft an.

In einer Reihe von Untersuchungen zum Einfluss des Trocknungsgases auf die Hüttensandmahlung an großtechnischen Anlagen zeigte sich, dass sich die Verwendung von Ofenabgas nachteilig auf die Eigenschaften von Hüttensandmehl im Vergleich zur Nutzung von Klinkerkühlerabluft auswirkt. Eine genaue Verifizierung der Parameter konnte nicht getroffen werden. Deshalb wurde im Forschungsinstitut der Einfluss der Mahlatmosphäre auf die Eigenschaften von hüttensandhaltigen Zementen untersucht.

Bei den Untersuchungen wurden drei unterschiedlich reaktive Hüttensande verschiedener Herkunft jeweils unter trockener Umgebungsluftatmosphäre, unter  $\text{CO}_2$ -Atmosphäre, bei Umgebungsluftatmosphäre mit 6 % Feuchte (bezogen auf den Hüttensand) sowie bei 6 % Feuchte unter  $\text{CO}_2$ -Atmosphäre gemahlen. Die Mahlungen wurden mit einer satzweise betriebenen Kugelmühle durchgeführt, die über eine elektrische Heizung verfügt. Bei allen Mahlversuchen wurde eine Temperatur von  $120^\circ\text{C}$  eingestellt. Für die Mahlungen unter  $\text{CO}_2$ -Atmosphäre wurde über vorhandene Ventile reines  $\text{CO}_2$  in die Mühle eingeblasen und so die enthaltene Umgebungsluft verdrängt. Für die Mahlung unter feuchter Atmosphäre wurde die mit Material befüllte Mühle vorgeheizt, die entsprechende Wassermenge kurz vor Versuchsbeginn zugegeben und der Mühlenendeckel wieder verschlossen.

Bei jeder der beschriebenen Atmosphären wurde der Hüttensand zunächst auf eine Feinheit von  $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$  nach Blaine gemahlen. Die Korngrößenverteilungen der ermahlenden Hüttensandmehle sind in **Bild I-32** dargestellt. Bei dieser Versuchsreihe zeigte sich jedoch, dass die unter feuchter Mühlenatmosphäre gemahlenden Hüttensandmehle trotz gleicher spezifischer Oberfläche eine größere Korngrößenverteilung aufwiesen. Aus diesem Grund wurden in einer weiteren Versuchsreihe durch Erhöhung der Mahldauer alle Hüttensande auf gleiche Korngrößenverteilung bei den verschiedenen Mühlenatmosphären gemahlen (**Bild I-33**). Die spezifischen Oberflächen der trocken und feucht gemahlenden Hüttensandmehle differierten dabei um ca.  $250 \text{ cm}^2/\text{g}$  nach Blaine.

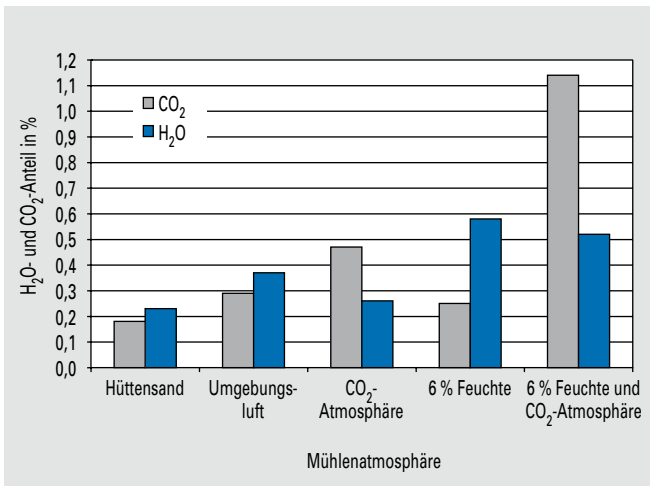


Bild I-34: CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Gehalte der Hüttensande

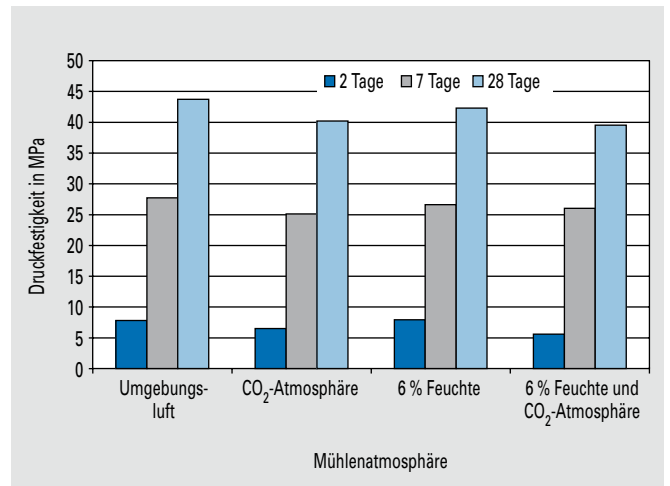


Bild I-35: Druckfestigkeiten der Hüttensandzemente

Die erzeugten Mehle wurden chemisch auf ihre Gehalte an Wasser und CO<sub>2</sub> untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Hüttensande, die unter einer CO<sub>2</sub>-Atmosphäre gemahlen wurden, auch einen höheren Gehalt an CO<sub>2</sub> nach der Mahlung aufwiesen. Besonders hohe CO<sub>2</sub>-Gehalte wiesen diejenigen Hüttensande auf, die unter einer feuchten CO<sub>2</sub>-Atmosphäre gemahlen wurden. Beispielhaft sind in **Bild I-34** die CO<sub>2</sub>- und Wassergehalte eines Hüttensands dargestellt. Weiterhin wurden die Hüttensandmehle mithilfe eines Labor-Hochleistungsrichters fraktioniert und die CO<sub>2</sub>- und Wassergehalte der einzelnen Fraktionen bestimmt. Dabei zeigte sich, dass die feineren Fraktionen deutlich mehr Wasser und CO<sub>2</sub> binden als die gröberen Fraktionen.

Zur Analyse der Festigkeitseigenschaften wurden die erzeugten Hüttensandmehle (Versuchsreihen mit gleicher Korngrößenverteilung) mit einem CEM I-Zement im Verhältnis 70 % Hüttensand zu 30 % CEM I gemischt und auf ihre Druckfestigkeiten nach 2, 7 und 28 Tagen geprüft.

In **Bild I-35** sind die Druckfestigkeiten nach 2, 7 und 28 Tagen des Hüttensands A beispielhaft dargestellt, der unter den vier beschriebenen Atmosphären auf gleiche Korngrößenverteilung gemahlen wurde. Nach 2 Tagen unterscheiden sich die Druckfestigkeiten kaum. Nur bei einer Kombination aus Wasserdampf- und CO<sub>2</sub>-Atmosphäre wurde ein Festigkeitsabfall nach 2 Tagen festgestellt. Nach 7 bzw. 28

Tagen ist jedoch auch ein deutlicher Einfluss auf die Druckfestigkeit bei Mahlung unter trockener CO<sub>2</sub>-Atmosphäre erkennbar. Eine Kombination aus Wasserdampf- und CO<sub>2</sub>-Atmosphäre bewirkt eine höhere Festigkeitsminderung.

Um diesem Effekt nachzugehen, wurden die erzeugten Mehle und auch die daraus hergestellten Fraktionen mittels Rasterelektronenmikroskop untersucht. In **Bild I-36** sind beispielhaft Hüttensandpartikel ein und derselben Herkunft dargestellt, die unter Umgebungsluft (links) und unter feuchter CO<sub>2</sub>-Atmosphäre gemahlen wurden. Auf den Partikeloberflächen der unter Umgebungsluft gemahlene Hüttensandmehle sind kaum Ablagerungen oder Reaktionsprodukte erkennbar. Dagegen sind die Oberflächen der unter feuchter CO<sub>2</sub>-Atmosphäre gemahlene Hüttensandpartikel deutlich mit Reaktionsprodukten belegt. Diese Reaktionsprodukte wurden mittels EDX analysiert und als Calciumcarbonatverbindung identifiziert.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Mahlatmosphäre einen Einfluss auf die Eigenschaften von Hüttensandmehl hat. Unabhängig von Reaktivität und Herkunft des Hüttensands beeinflusst eine Mahlung unter CO<sub>2</sub>-Atmosphäre, besonders unter feuchter CO<sub>2</sub>-Atmosphäre, die Festigkeitseigenschaften negativ. Der Grund dafür ist die erhöhte Bindung von CO<sub>2</sub> und Wasser an den Partikeloberflächen in Form von Reaktionsprodukten. Diese Reaktionsprodukte führen ebenfalls zu erhöhten spezifischen Oberflächen bei der Messung mit dem Blaine-Verfahren.

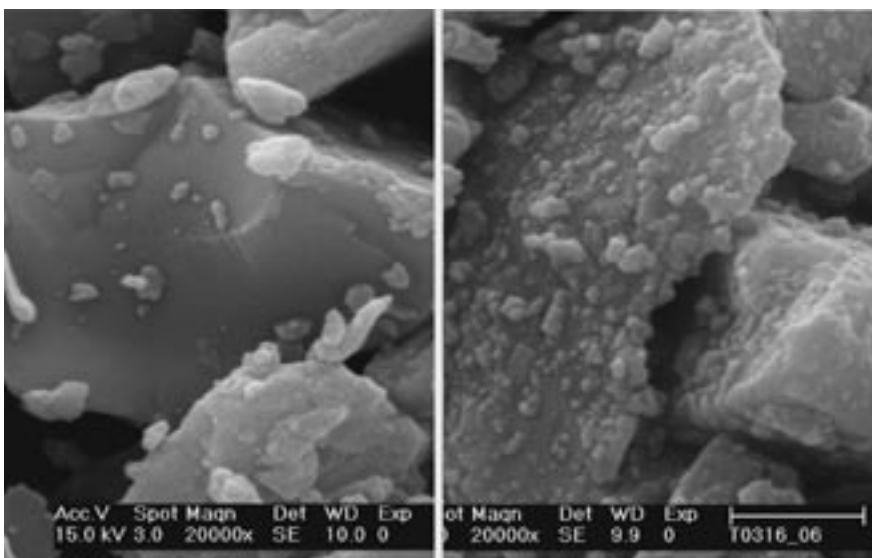


Bild I-36: REM-Aufnahmen von Hüttensandpartikeln, die unter verschiedenen Atmosphären gemahlen wurden; links Umgebungsluft, rechts CO<sub>2</sub>-Atmosphäre mit 6 % Feuchtigkeit



# II

## Umweltschutz bei der Zementherstellung

Die umweltverträgliche Herstellung von Zement sowie sämtliche damit einhergehenden Themen haben das Forschungsinstitut der Zementindustrie auch in diesem Berichtszeitraum intensiv beschäftigt. Dabei haben, nicht zuletzt aufgrund des seit dem Jahr 2005 europaweit eingeführten Handels mit Treibhausgasen, der CO<sub>2</sub>-Handel sowie die damit verbundenen technischen Aspekte eine wesentliche Rolle gespielt. So wurden in den vergangenen beiden Jahren intensive Untersuchungen zur Ermittlung spezifischer CO<sub>2</sub>-Emissionen verschiedener Brennstoffe durchgeführt. Bezüglich der in der Zementindustrie als Ersatzbrennstoff weit verbreiteten Altreifen, bei denen eine entsprechende Analyse für die einzelnen Unternehmen nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand möglich wäre, sind über das Forschungsinstitut zentral entsprechende Untersuchungen durchgeführt worden. Die so ermittelten Werte sind in der Zwischenzeit von den in Deutschland zuständigen Behörden als Standardwerte akzeptiert worden.

Daneben ist gemeinsam mit der European Cement Research Academy (ecra) ein Forschungsvorhaben begonnen worden, bei dem es darum geht, durch eine direkte CO<sub>2</sub>-Messung am Kamin Aussagen über den Ausstoß an biogenem Kohlenstoff machen zu können. Erste Versuche zu diesem Thema waren durchaus viel versprechend, wobei auch hier die spezifischen Randbedingungen des Klinkerherstellungsprozesses berücksichtigt werden müssen.

Neben der Bestimmung und Bewertung von CO<sub>2</sub>-Emissionen wurde gemeinsam mit den Zementwerken auch eine Vielzahl an Untersuchungen zur Reduktion von NO<sub>x</sub>-Emissionen durchgeführt. So konnte der Nachweis erbracht werden, dass das SNCR-Verfahren mit der gestuften Verbrennung kombiniert werden kann. Weiterhin haben die bisherigen Erfahrungen ergeben, dass bis auf Weiteres aus Sicht der deutschen Zementindustrie das SNCR-Verfahren nach wie vor den Stand der Technik zur Minderung von Stickstoffoxidemissionen darstellt.

Speziell im Zusammenhang mit dem Einsatz von Abfällen sind weitere Erfahrungen mit der kontinuierlichen Messtechnik für Quecksilber gesammelt worden. An dieser Stelle hat die deutsche Zementindustrie gemeinsam mit dem Forschungsinstitut quasi eine Vorreiterrolle eingenommen. Zahlreiche der eignungsgeprüften und kommerziell verfügbaren Geräte waren erst nach entsprechenden Modifikationen einzusetzen. Diese Analysatoren mussten dabei an die individuellen Verhältnisse an den Standorten angepasst werden.

Weiterhin hat es in den vergangenen Jahren wesentliche Änderungen im Zusammenhang mit der Durchführung von Umweltmessungen sowie auch der Überwachung und Prüfung von kontinuierlich arbeitenden Analysatoren gegeben. Durch diese Neuerungen erhöht sich der erforderliche Kontroll- und Prüfaufwand – sowohl für die externen Messinstitute als auch für die Betreiber.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Zementindustrie ihre Umwelleistungen in den vergangenen Jahren weiter gesteigert hat. Mittlerweile stellen somit selbst Produktionsanlagen in unmittelbarer Nähe von Wohnbebauungen kein Problem mehr dar.



## Gesetzgebung ■

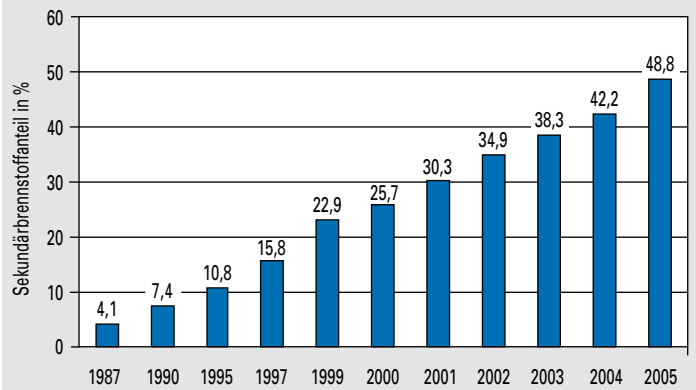
### Entwicklung des Ersatzbrennstoffeinsatzes in deutschen Zementwerken und Umsetzung der 17. BImSchV

Die deutsche Zementindustrie verfügt mittlerweile über eine langjährige Erfahrung mit dem ordnungsgemäßen und schadlosen Einsatz geeigneter Ersatzbrennstoffe in ihren Drehöfen. **Bild II-1** zeigt die eindrucksvolle Entwicklung der Substitutionsrate vom Jahr 1987 bis heute. Im Durchschnitt konnten im Jahr 2005 annähernd 50 % des Brennstoffenergiebedarfs durch den Einsatz geeigneter und teilweise aufbereiteter Ersatzbrennstoffe gedeckt werden. Dies stellt aus Sicht der Zementindustrie nicht nur ökonomisch, sondern insbesondere auch ökologisch eine besondere Leistung dar. Die im Jahr 2005 substituierte Brennstoffmenge entspricht umgerechnet mehr als 1,5 Mio. Tonnen Steinkohle, die so eingespart werden konnten.

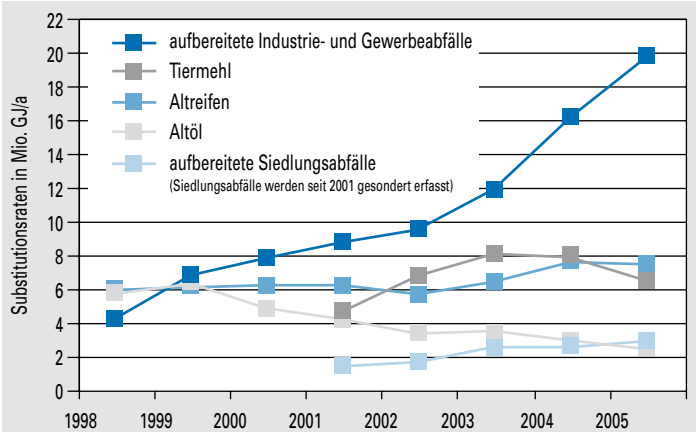
Bei den eingesetzten Ersatzbrennstoffen spielen bereits seit einigen Jahren die aufbereiteten Industrie- und Gewerbeabfälle eine herausragende Rolle. Seit Mitte des Jahres 2005 ist auch ein vermehrtes Aufkommen an entsprechend aufbereiteten Siedlungsabfällen zu verzeichnen, die ebenfalls als Ersatzbrennstoffe eingesetzt werden können, wenn sie die erforderlichen Qualitätskriterien erfüllen (**Bild II-2**). Dieses vermehrte Auftreten aufbereiteter Siedlungsabfälle ist eine direkte Folge des ab 01.06.2005 in Kraft getretenen Deponierungsverbots für nicht vorbehandelte Abfälle.

Die Zementwerke, die Abfälle einsetzen, unterliegen den Bestimmungen der Verordnung über die Verbrennung und Mitverbrennung von Abfällen (17. BImSchV). In dieser Vorschrift, die zuletzt im August 2003 novelliert wurde, werden die Vorgaben der europäischen Abfallverbrennungsrichtlinie umgesetzt. Allerdings enthält das deutsche Umweltrecht im Gegensatz zu den europäischen Vorgaben einige Verschärfungen, wobei aus Sicht der deutschen Zementindustrie insbesondere die Regelungen bezüglich der Stickstoffoxidemissionen zu benennen sind. Während nach europäischem Recht für bestehende Klinkeröfen unabhängig von der eingesetzten Abfallmenge nach wie vor ein fester  $\text{NO}_x$ -Grenzwert von  $800 \text{ mg/m}^3$  gilt, ist in Deutschland zunächst grundsätzlich ein  $\text{NO}_x$ -Grenzwert von  $500 \text{ mg/m}^3$  einzuhalten. Darüber hinaus enthält das deutsche Umweltrecht allerdings noch eine Passage, die ab einer ein-

**Bild II-1:** Entwicklung des Ersatzbrennstoffeinsatzes in der deutschen Zementindustrie



**Bild II-2:** Entwicklung der Substitutionsraten für ausgewählte Stoffe



gesetzten Abfallmenge von mehr als 60 % der Feuerungswärmeleistung zusätzlich eine Mischungsrechnung für  $\text{NO}_x$  vorsieht. Dies würde dazu führen, dass Ofenanlagen, die die Brennstoffenergie zu 100 % aus geeigneten Abfällen generieren, einen  $\text{NO}_x$ -Grenzwert von  $200 \text{ mg/m}^3$  einhalten müssten. Da es fraglich ist, ob ein solch ambitionierter Wert derzeit überhaupt mit den nach dem Stand der Technik zur Verfügung stehenden Methoden erreicht oder längerfristig eingehalten werden kann, enthält die 17. BImSchV bezüglich der Anwendung der Mischungsrechnung eine Übergangsfrist. Diese läuft allerdings zum 30.10.2007 aus. Parallel zeigt die weitere Zunahme des Ersatzbrennstoffeinsatzes in den deutschen Zementwerken, dass es mittlerweile etliche Anlagen gibt, die sowohl bezüglich der genehmigten als auch der tatsächlich erreichten Substitutionsraten an diese 60%-Grenze heranreichen, bzw. diese bereits übertreffen.

In Deutschland ist von der Industrie gemeinsam mit dem Forschungsinstitut der Zementindustrie in den vergangenen Jahren eine Vielzahl von Messungen durchgeführt worden, mit dem Ziel, die Stickstoffoxidemissionen weiter zu senken. Dennoch ist es auch auf Grundlage dieser zahlreichen

Versuche, bei denen diverse technische Parameter und Randbedingungen variiert wurden, nach wie vor fraglich, ob in jedem Fall ein  $\text{NO}_x$ -Wert von  $200 \text{ mg/m}^3$  sicher eingehalten werden kann. Insofern wäre es aus Sicht der Zementindustrie wünschenswert, wenn auch nach Ablauf der Übergangsfrist zum 30.10.2007 Wege gefunden werden könnten, die den ökologisch und ökonomisch sinnvollen Abfalleinsatz in den deutschen Zementwerken weiterhin sicherstellen. Dies gilt insbesondere auch für die Fälle, in denen der Nachweis erbracht wird, dass es trotz Anwendung des Stands der Technik (noch) nicht möglich ist, die sehr ambitionierten Vorgaben bezüglich der  $\text{NO}_x$ -Grenzwerte einzuhalten. Dies gilt umso mehr, als dass die seinerzeit in die 17. BImSchV aufgenommene 60%-Regel eine ausschließlich politisch motivierte Entscheidung gewesen ist. Es gab und gibt keinerlei ökologische Aspekte, die eine solche Regelung begründen. Angesichts der aktuellen Diskussionen bezüglich der Schonung natürlicher Ressourcen wäre es völlig widersinnig, wenn die ökologisch hochwertige Nutzung von Ersatzbrennstoffen in den deutschen Zementwerken durch Hürden behindert würde, die vor einigen Jahren aus mittlerweile überholten, rein politischen Erwägungen aufgebaut wurden.

### Novellierung der europäischen Abfallrahmenrichtlinie

Bereits im Dezember 2005 hat die Europäische Kommission einen Vorschlag für die Novellierung der „Richtlinie des Europäischen Parlamentes und des Rates über Abfälle“ vorgelegt. Mit diesem Vorschlag soll die ursprünglich aus dem Jahr 1975 stammende Abfallrahmenrichtlinie (Richtlinie 75/442/EWG) überarbeitet und auf aktuelle Belange der Abfallwirtschaft angepasst werden. Im Vorfeld des Vorschlags hatte die EU-Kommission bereits ihre grundlegenden Ideen und Absichten in einer Strategie für die Vermeidung und das Recycling von Abfällen kommuniziert.

Ein wesentlicher Grund für die nun anstehende Revision der Europäischen Abfallrahmenrichtlinie ist auch darin zu sehen, dass es in der jüngeren Vergangenheit immer wieder Auseinandersetzungen und Diskussionen bei der Auslegung von Begriffsbestimmungen und Definitionen im Bereich der europäischen Abfallwirtschaft gegeben hatte. Diese Unklarheiten, die teilweise zwischen den einzelnen Mitgliedsstaaten der EU, in manchen Fällen aber sogar innerhalb einzelner Regionen bestimmter Länder bestanden, sollen nun durch die revidierte Fassung der Abfallrahmenrichtlinie behoben werden.

Aus Sicht der deutschen Zementindustrie gab es zunächst zu dem Kommissionsvorschlag keine wesentlichen Änderungsanträge. Im Gegenteil: Der Vorschlag enthielt einige sowohl ökologisch als auch ökonomisch sinnvolle Ansätze. So sollte beispielsweise nach Vorstellung der Kommission der derzeit im Abfallrecht noch verankerte Vorrang der stofflichen Aufarbeitung von Altölen entfallen.

Ausgehend von dem Kommissionsvorschlag ist im Jahr 2006 der Prozess der parlamentarischen Beratung begonnen worden. In diesem Zusammenhang wurden im Vorfeld der Abstimmung über das Kommissionspapier über 600 Änderungsanträge von den Parlamentariern eingereicht. Nach einer Vorabstimmung im Unterausschuss wurde daraus abschließend ein Vorschlag erstellt, der am 13.02.2007 in erster Lesung im EU-Parlament behandelt wurde.

Angesichts der Vielzahl der Änderungsvorschläge gibt es auch im Nachgang zur ersten Lesung noch einige Aspekte, die für die Zementindustrie von besonderer Bedeutung sind. In diesem Zusammenhang sind zunächst die Diskussionen zur Definition des Verwertungsbegriffs sowie zur Festlegung von Kriterien zu nennen, die

das Ende der Abfalleigenschaft von Stoffen begründen. Weiterhin ist anzumerken, dass durch die Änderungen des Parlaments nun auch wieder über die Frage verhandelt wird, ob der stofflichen Aufarbeitung von Altölen weiterhin im europäischen Abfallrecht ein Vorrang eingeräumt werden sollte. Dies wäre ein klarer Rückschritt, da bereits seit geraumer Zeit nachgewiesen ist, dass die hochwertige energetische Nutzung von Altölen einer stofflichen Verwertung ökologisch in nichts nachsteht.

Ein weiterer, aus Sicht der Zementindustrie wesentlicher Punkt sind die derzeit im Europäischen Parlament geführten Diskussionen zu Effizienzkriterien auch für Mitverbrennungsanlagen. Auslöser hierfür war zunächst die Frage, wie für reine Müllverbrennungsanlagen anhand von Wirkungsgraden Kriterien erarbeitet werden können, die es besonders effizienten Verbrennungsanlagen gestatten könnten, den Verwerterstatus zu erlangen. Der Einsatz eines geeigneten Ersatzbrennstoffs im Klinkerbrennprozess stellt aus technischer Sicht stets eine hochwertige Verwertung dar, weshalb an dieser Stelle keine weiteren Kriterien erforderlich sind.

Voraussichtlich wird über die novellierte Europäische Abfallrahmenrichtlinie nun eine fünfstufige Hierarchie im Zusammenhang mit der Behandlung von Abfällen festgelegt werden. Diese gliedert sich wie folgt:

1. Vermeidung und Verringerung der Erzeugung von Abfällen
2. Wiederverwendung von Abfällen
3. Recycling von Abfällen
4. Sonstige Verwertungsverfahren (einschließlich energetischer Verwertung)
5. Abfallbeseitigung

Dies stellt im Gegensatz zu der im Deutschen Recht verankerten dreistufigen Hierarchie (1. Vermeidung, 2. Verwertung, 3. Beseitigung) eine Änderung dar. Dies gilt insbesondere auch deshalb, weil europäisch die stoffliche Nutzung (Recycling) zunächst als grundsätzlich höherwertig im Vergleich zur energetischen Verwertung angesehen wird. Demgegenüber enthält unser (bisheriges) deutsches Abfallrecht den vernünftigen Ansatz, dass stoffliche und energetische Verwertung als gleichwertig zu betrachten sind. Der Vorrang ist jeweils der umweltverträglicheren Verwertungsart einzuräumen. Angesichts der fortgeschrittenen Diskussion in Europa ist abzusehen, dass dieser Ansatz zumindest europäisch nicht mehrheitsfähig sein dürfte. Da gerade die energetische Verwertung von

Abfällen in den deutschen Zementwerken mittlerweile einen wesentlichen Beitrag zu einer hochwertigen und qualifizierten Abfallentsorgung leistet, ist allerdings nicht zu erwarten, dass sich aus einer formalen Änderung der Abfallhierarchie wesentliche Auswirkungen auf den Abfalleinsatz in deutschen Zementwerken ergeben werden. Nichtsdestotrotz ist nach Abschluss des Revisionsprozesses in Europa bei der dann anstehenden nationalen Implementierung der novellierten Richtlinie dafür Sorge zu tragen, dass der bisherige, sowohl ökonomisch als auch ökologisch sinnvolle Einsatz von Ersatzroh- und -brennstoffen in den deutschen Zementwerken nicht erschwert wird.

### Revision des BAT-Dokuments Zement und Kalk

Die europäische Richtlinie zur integrierten Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU-Richtlinie) verlangt, dass sich die Mitgliedsstaaten der EU in regelmäßigen Abständen über den erreichten Stand der Technik bezüglich verschiedener Industrien informieren. Diese Information sowie der damit verbundene Wissensaustausch findet über so genannte BAT-Referenzdokumente (BREF-Dokumente) statt. Von dieser Anforderung der regelmäßigen Berichterstattung ist u. a. auch die Zementindustrie betroffen. Das entsprechende BREF-Dokument, in dem Zement- und Kalkindustrie gemeinsam behandelt werden, wurde im Dezember 2001 als eines der ersten entsprechenden Dokumente von der Europäischen Kommission veröffentlicht.

Das europäische Recht sieht eine regelmäßige Überarbeitung und Anpassung dieser BREF-Dokumente vor, weshalb bereits im September 2005 mit der Revision des entsprechenden Papiers für die Zement- und Kalkindustrie begonnen wurde. Der gesamte Prozess wird von einem Büro der Europäischen Kommission gesteuert, das in Sevilla angesiedelt ist. Von diesem Büro wird letztlich auch das überarbeitete BREF-Dokument erstellt.

Auf nationaler Ebene hat das Umweltbundesamt eine Spiegelgruppe eingerichtet. In dieser sind Behördenmitarbeiter von Bundes- und Landesebene sowie Angehörige der Zement- und Kalkindustrie vertreten. Von dieser deutschen Spiegelgruppe wurden entsprechend den Vorgaben des europäischen Zeitplans bis zum 01.06.2006 Informationen und Unterlagen zum Europäischen Büro nach Sevilla gesendet. Aus den europaweit gesammelten Informationen ist von diesem dann ein Vorentwurf

für das revidierte BAT-Papier erstellt worden. Dieser wurde im Januar 2007 in einer mehrtägigen Sitzung in Sevilla von der so genannten Technical Working Group (TWG) diskutiert. Die TWG setzt sich aus europäischen Fachexperten zusammen, die letztlich über die technischen Inhalte sowie die Ausgestaltung des Dokuments mitentscheiden.

Aus deutscher Sicht ist sicherlich von besonderem Interesse, dass zwischenzeitlich die in Deutschland bereits seit mehreren Jahren etablierte SNCR-Technik zur Reduktion der Stickstoffoxidemissionen auch in Europa eine weite Verbreitung gefunden hat.

Die Diskussionen zur neuen Festlegung von erreichbaren Emissionsniveaus für verschiedene Komponenten haben bisher im Zusammenhang mit der Revision des BREF-Dokuments noch nicht stattgefunden. Diese werden sicherlich bei der nächsten Sitzung der TWG anstehen. Dann soll ein überarbeiteter Entwurf des Dokuments vorgelegt werden, der auch Vorschläge für Emissionsniveaus enthält, die mit den entsprechenden Techniken erreicht werden können. Angesichts der Komplexität des gesamten Prozesses ist davon auszugehen, dass die Fertigstellung des überarbeiteten Dokuments nicht vor Ende 2007 beziehungsweise Anfang 2008 erfolgen wird.

#### DIN EN 14181 – Erfahrungen mit der Umsetzung

Die europäische Norm DIN EN 14181 gilt seit Dezember 2005 für Anlagen, die der 17. BImSchV unterliegen. Die wesentlichen Inhalte dieser Norm befassen sich mit neuen Anforderungen an die Durchführung von Funktionsprüfung und Kalibrierung (QAL 2) sowie die regelmäßige Wartung kontinuierlicher Emissionsmessgeräte (QAL 3). Durch das Erscheinen der überarbeiteten VDI 3950 im Dezember 2006 gelten praktisch die gleichen Regelungen zukünftig auch für TA-Luft-Anlagen.

Im Laufe des Jahres 2006 wurden von der Umweltmessstelle des Forschungsinstituts zahlreiche Funktionsprüfungen und Kalibrierungen nach DIN EN 14181 durchgeführt. Als problematisch hat sich dabei häufig die so genannte Variabilitätsprüfung herausgestellt. Die Variabilität ersetzt den Vertrauensbereich der alten VDI 3950 und wird vor der Klassierung im Messwertrechner von allen Halbstundenmittelwerten abgezogen. Die Berechnung der Variabilität erfolgt auf der Grundlage von mindestens 15 Messwertpaaren, die

**Tafel II-1: Maximal zulässige Messunsicherheit von kontinuierlichen Emissionsmessgeräten gemäß Anhang III der 17. BImSchV**

Komponente	Maximal zulässige Messunsicherheit des kontinuierlichen Messgeräts <sup>1)</sup> in %
Kohlenmonoxid	10
Schwefeldioxid	20
Stickstoffdioxid	20
Gesamtstaub	30
Organisch gebundener Gesamtkohlenstoff	30
Chlorwasserstoff	40
Fluorwasserstoff	40
Quecksilber	40

<sup>1)</sup> als halbe Länge eines 95%-Vertrauensbereichs

im Rahmen der Kalibrierung vom kontinuierlichen Messgerät und zeitgleich mit einem Standardreferenzmessverfahren ermittelt werden. Sie darf nicht größer sein als die im Anhang III der 17. BImSchV genannte maximale Messunsicherheit (**Tafel II-1**). So ist bei einem Staubgrenzwert von 10 mg/m<sup>3</sup> lediglich eine maximale Messunsicherheit von 1,5 mg/m<sup>3</sup> über den gesamten Messbereich zulässig.

Insbesondere in Verbindung mit der Forderung nach Einhaltung des gültigen Kalibrierbereichs kann dies zu Schwierigkeiten führen. Die obere Grenze des gültigen Kalibrierbereichs ergibt sich aus dem maximalen Messwert während der Kalibrierungsmessungen zuzüglich 10 %. Während der Kalibrierung sollte die im Jahresverlauf auftretende mögliche Schwankungsbreite der Emissionen (ggfs. bis zum zweifachen Tagesgrenzwert) daher nach Möglichkeit abgedeckt werden, um später eine Wiederholkalibrierung zu vermeiden. Falls während der Kalibrierung Eingriffe in den Anlagenbetrieb notwendig sind, ist die zuständige Behörde hierüber zu informieren.

Bei Staubkalibrierungen hat diese Vorgehensweise in Einzelfällen zu Problemen geführt. Hierbei wurde durch gezielte Eingriffe ins Elektro- oder Gewebefilter versucht, höhere Staubkonzentrationen bis zum zweifachen Tagesmittelwert einzustellen. Da der punktgenaue Eingriff oftmals schwierig ist, wurden teilweise Staubkonzentrationen erreicht, die deutlich über dem angestrebten Vorgabewert lagen. Die zulässige Messunsicherheit wird jeweils für den Tagesmittelwert ermittelt und ist über den gesamten Wertebereich konstant. Die Streuung einzelner deutlich höherer Staubkonzentrationen kann dann dazu führen, dass die zulässige Messunsicherheit überschritten wird. Somit ist darauf zu achten, dass bei der Kalibrierung Konzentrationen

erzeugt werden, die zwar bis zur Höhe des Halbstundenmittelwerts, aber nicht wesentlich darüber hinaus reichen.

Eine weitere Neuerung der DIN EN 14181 ist die laufende Qualitätssicherung während des Betriebs (QAL 3). Diese Tätigkeiten liegen im Verantwortungsbereich des Betreibers. Hauptaufgaben dabei sind:

1. Kontrolle, dass alle Messwerte innerhalb des gültigen Kalibrierbereichs liegen. Diese Aufgabe wird automatisch vom Messwertrechner übernommen.
2. Regelmäßige Überprüfung des kontinuierlichen Messgeräts mit Referenzproben. Je nach Bauart des Geräts sind als Referenzmaterialien z. B. Prüfgase, Kalibrierküvetten oder optische Filter zu verwenden. Die Ergebnisse der Null- und Referenzpunktkontrolle müssen in Regelkarten aufgezeichnet und ausgewertet werden. In Abhängigkeit vom Ergebnis der Überprüfung muss das Gerät gegebenenfalls nachjustiert oder repariert werden. Die Häufigkeit der Überprüfung sollte dem Wartungsintervall entsprechen, das im Eignungsprüfungsbericht des Geräts angegeben ist. Viele Gerätehersteller bieten mittlerweile eine zu ihren Geräten passende Software an, die diese Arbeiten erleichtert. Diese Software kann auf dem Messwertrechner installiert werden und ermöglicht eine teilweise Automatisierung der QAL 3.
3. Für jedes kontinuierliche Messgerät muss ein Kontrollbuch geführt werden, in dem u. a. Daten zur Identifizierung des Geräts sowie durchgeführte Wartungs- und Reparaturarbeiten dokumentiert werden müssen.

Im Rahmen der jährlich stattfindenden Funktionsprüfung werden die vom Betreiber durchgeführten Tätigkeiten zur QAL 3 von einem unabhängigen Messinstitut überprüft.

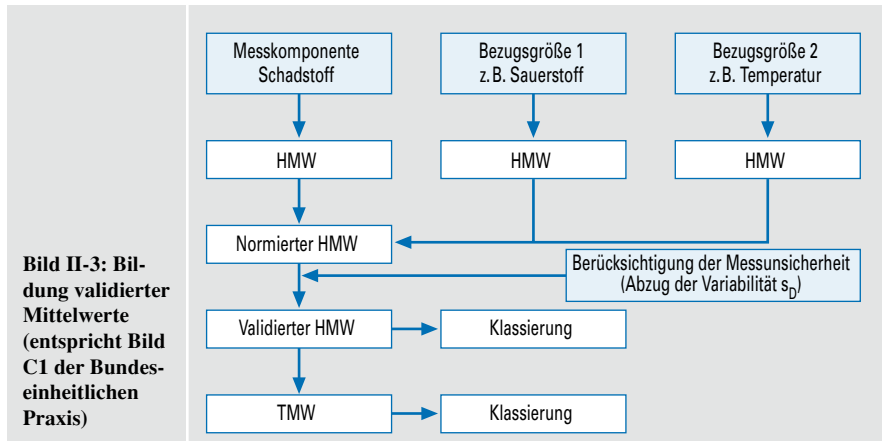


### Neue Regelung der Messwertklassierung für die Emissionsüberwachung

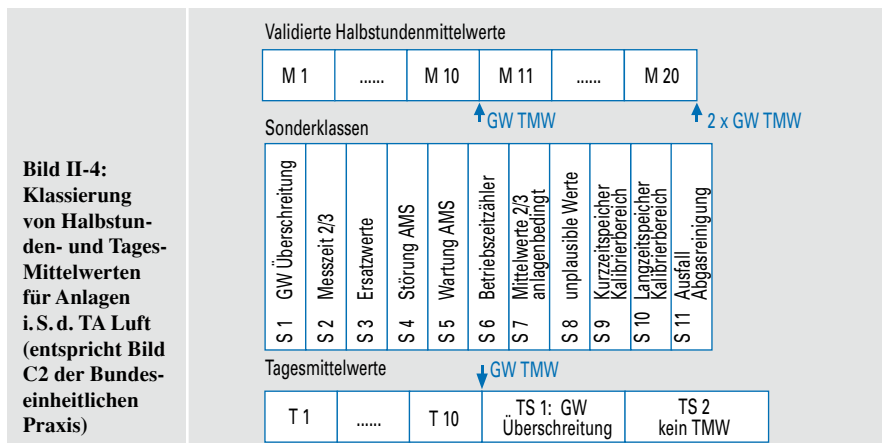
Die Bundeseinheitlichen Praxis bei der Überwachung von Emissionen (Rundschreiben des BMU vom 13.06.2005, Az.: IG I2 – 45053/5, GMBL 2005, Nr. 38, S. 795) regelt in Verbindung mit der DIN EN 14181 Eignungsprüfung, Einbau, Kalibrierung und Wartung von automatischen Emissionsmessenrichtungen und die Auswertung von kontinuierlichen Emissionsmessungen. Im Bereich der Auswertung hat sich dadurch seit 2005 insbesondere die Klassierung der anfallenden Messwerte geändert. Grundlage für die Auswertung sind nach wie vor die Vorgaben der 17. BImSchV oder der TA Luft (für den Bereich der Zementindustrie). Die Bundeseinheitliche Praxis legt im Genaueren fest, wie die Normierung der Messwerte und Klassenbildung zu erfolgen hat.

Wurde früher die Messunsicherheit durch die Berücksichtigung des so genannten Toleranzbereichs (TB) für Halbstundenmittelwerte (HMW) und des Vertrauensbereichs (VB) für Tagesmittelwerte (TMW) in den Messwertklassen 11 und 21 berücksichtigt, so hat sich dieses Vorgehen grundsätzlich geändert. Der normierte Messwert wird nun vor der Klassierung um die aus der Kalibrierung gemäß DIN EN 14181 ermittelte Messunsicherheit (Variabilität,  $s_p$ ) vermindert. Erst dann werden die validierten Halbstundenmittelwerte den Klassen M 1 bis M 20 oder einer der Sonderklassen S 1 bis S 14 zugeordnet (Bild II-3). Dabei sind die Klassen M 1 bis M 20 in gleichen Klassenbreiten für TA-Luft-Anlagen bis zum zweifachen Tagesmittelwert (Bild II-4) und für Anlagen der 17. BImSchV bis zum dort festgelegten Halbstundenmittelwert (Bild II-5) definiert. Überschreitungen werden der Sonderklasse S 1 zugeordnet. Messwerte, die zu mehr als einem Drittel des Integrationszeitraums durch Anfahren oder Abfahren der Anlage geprägt sind, müssen gesondert der Klasse S 7 zuge-wiesen werden.

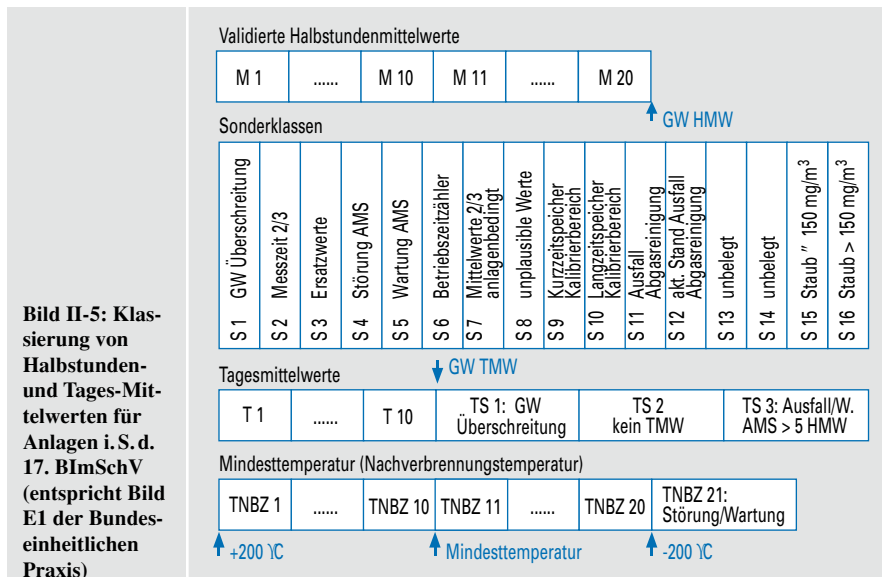
Aus den validierten Halbstundenmittelwerten (HMW) wird abschließend der Tagesmittelwert (TMW) gebildet. Tagesmittelwerte sind in den Klassen T 1 bis T 10 gleicher Klassenbreite bis zum Grenzwert für den Tagesmittelwert (GW TMW) auszuweisen. Überschreitungen des Grenzwerts werden in der Klasse TS 1 festgehalten und fehlende Tagesmittelwerte in der Klasse TS 2. Alle Mittelwerte sind mit dem zugehörigen Zeitpunkt und Status sowie mit der Kenngröße der Betriebsart der Anlage abzuspeichern.



**Bild II-3:** Bildung validierter Mittelwerte (entspricht Bild C1 der Bundeseinheitlichen Praxis)



**Bild II-4:** Klassierung von Halbstunden- und Tages-Mittelwerten für Anlagen i. S. d. TA Luft (entspricht Bild C2 der Bundeseinheitlichen Praxis)



**Bild II-5:** Klassierung von Halbstunden- und Tages-Mittelwerten für Anlagen i. S. d. 17. BImSchV (entspricht Bild E1 der Bundeseinheitlichen Praxis)

Spezifisch für die jeweilige Anlage soll vom Anlagenbetreiber in Abstimmung mit der zuständigen Behörde in einem Auswertungskonzept eine verständliche Beschreibung der Auswertungsvorgänge, der Basis für die Parametrierung und die Art der Berücksichtigung anlagenspezifischer Gegebenheiten dokumentiert werden. Dabei sind insbesondere die Betriebszustände sowie die Statussignale zu deren Abgrenzung zu

definieren. Die Parametrierung gemäß dem abgestimmten Auswertungskonzept wird im Rahmen des Prüfberichts des Emissionswertrechners durch die §26-BImSchG-Messstelle dokumentiert.

Neben der Klassierung der Messwerte sind erstmalig auch Mindest- bzw. Nachverbrennungstemperaturen zu überwachen und in 20 Klassen mit einheitlicher Breite

auszuweisen. Die zu überwachende Mindesttemperatur ist dabei auf die Grenze zwischen der 10. und 11. Klasse zu legen. Das Mittelungsintervall beträgt zehn Minuten. Temperaturstörungen werden in Klasse 21 abgelegt. Diese engmaschige Überwachung der Mindesttemperatur verlangt eine hohe Verfügbarkeit der Temperaturmessung bzw. der Thermoelemente. Somit empfiehlt es sich, die Temperaturmessung redundant auszuführen, um letztlich die Aktivierung der Verriegelung der Sekundärbrennstoffe zu vermeiden.

Aufgrund der Neuregelungen waren viele Betreiber gezwungen, im Jahr 2006 neue Messwertrechner anzuschaffen. Die deutlich aufwendigere Auswertung kontinuierlicher Emissionsdaten nach DIN EN 14181 bzw. neuer VDI 3950 konnte von den vorhandenen Systemen nicht mehr geleistet werden. Viele Rechner befinden sich derzeit noch in der Inbetriebnahme-phase. Es zeigt sich, dass nach der Erstparametrierung eine eingehende Prüfung des Datenmodells anzuraten ist, um mögliche Fehler frühzeitig zu beseitigen.

### Überwachung kontinuierlich messender Quecksilberanalysatoren

Betreiber von Anlagen, in denen Abfälle (mit) verbrannt werden, sind in Deutschland verpflichtet, Quecksilberemissionsgrenzwerte kontinuierlich zu überwachen. Die dafür in Frage kommenden automatischen Messsysteme sind regelmäßig wiederkehrend in ihrer Funktion zu prüfen und zu kalibrieren. Ausführungsvorschrift dafür ist seit April 2006 die DIN EN 14884. Sie konkretisiert die Besonderheiten der Hg-Messung als Spezialfall der allgemeineren DIN EN 14181.

Die wesentlichen Aspekte der DIN EN 14884, die über die normale Prüfung hinaus geregelt werden und wichtig für den Betreiber sind, betreffen:

1. die Wartung der Messeinrichtung unmittelbar vor der Kalibrierung nach den Empfehlungen des Herstellers,
2. die (behördlich abgestimmte) Anwendung von Nullpunkthypothesen auch dann, wenn der Bereich der Referenzmessergebnisse 15 % des Emissionsgrenzwerts übersteigt,
3. die Vorhaltung und den Einsatz von geeigneten Referenzmaterialien für die vom Betreiber durchzuführende Qualitätsüberwachung (QAL3) mit Prüfung des Null- und Referenzpunkts.

Besonders Punkt 3 ist problematisch, da es bislang keine lagerfähigen Referenzmate-

rialien für die QAL3-Prüfung des Referenzpunkts von kontinuierlich arbeitenden Quecksilberemissionsmessgeräten gibt. Damit ist es vom Grundsatz her derzeit für die Betreiber gar nicht möglich, sämtliche normativen Vorgaben im Zusammenhang mit der Überwachung ihrer Quecksilberanalysatoren zu erfüllen.

Allerdings beinhaltet die DIN EN 14884 auch eine wesentliche Vereinfachung im Vergleich zu der bisherigen Vorschrift: Zukünftig kann auf die Beprobung der Partikelphase bei Vergleichsmessungen verzichtet werden, sofern der partikelgebundene Anteil der Hg-Emissionen  $\leq 2\%$  ist. Damit verringert sich der erforderliche Prüf- und Kostenaufwand deutlich, da auf die Beprobung der Staubphase und insbesondere auf die Überwachung der isokinetischen Absaugbedingungen verzichtet werden kann. Außerdem dürfen jetzt geeignete Modifikation des Standardreferenzmessverfahrens vorgenommen werden, wenn Störsubstanzen im Abgas die Messung verfälschen. So kann auf die besonderen Bedürfnisse der Zementindustrie reagiert werden, z. B. wenn die Rohstoffe lagerstättenbedingt schwere Halogene (Bromide oder Jodide) ins Abgas abgeben und das kontinuierliche Hg-Messgerät unplausible Ergebnisse liefert.

Eine weitere, im Vergleich zu den starren Vorgaben der DIN EN 14181 praxisorientierte Änderung sieht die im Dezember 2006 veröffentlichte Richtlinie VDI 3950 vor. Auf deren Grundlage ist es jetzt wieder möglich, den abzudeckenden Messbereich bei Kalibrierungen durch Einsatz von Referenzmaterialien – insbesondere Prüfgasen – zu erweitern, wenn die Anlage zum Zeitpunkt der Kalibrierungen ausschließlich niedrige Emissionskonzentrationen liefert und der Betreiber darauf keinen Einfluss nehmen kann. Dies ist an Drehofenanlagen der Zementindustrie nicht nur für Quecksilber von Bedeutung, sondern auch für andere Emissionskomponenten, wie z. B.  $\text{NO}_x$ . Teuere Wiederhol- bzw. Ergänzungskalibrierprüfungen aufgrund von Überschreitungen eines zu eng kalibrierten Messbereichs können durch die von der Richtlinie VDI 3950 (2006) gestattete Vorgehensweise vermieden werden, ohne dass die Qualität der Kalibrierung sinkt.

Betreiber, deren Anlagen der 17. BImSchV unterliegen, sollten diese Möglichkeit im Vorfeld mit der Behörde abstimmen. Für diese Anlagen gilt zunächst die europäische Norm DIN EN 14181, die die neuen praktikablen Regelungen der VDI 3950 (2006) noch nicht vorsieht.

## Klimaschutz ■

### Entwicklung der $\text{CO}_2$ -Emissionen Brennstoffbedingte $\text{CO}_2$ -Emissionen

Das Treibhauspotenzial 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  $\text{CO}_2$ -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  $\text{CO}_2$ -Emissionen sanken im Zeitraum von 2002 bis 2005 von 0,168 auf 0,132 t  $\text{CO}_2$ /t Zement. Dies entsprach einer Verminderung von 5,16 auf 4,18 Mio. t  $\text{CO}_2$ /a. Hierin sind die  $\text{CO}_2$ -Emissionen aus dem Einsatz von Sekundärbrennstoffen – der Systematik der Selbstverpflichtung der deutschen Zementindustrie zum Klimaschutz folgend – nicht berücksichtigt, da sie fossile Brennstoffe vollständig substituieren. Da die Abfälle ansonsten an anderer Stelle ihren Kohlenstoffgehalt zu  $\text{CO}_2$  oder anderen Treibhausgasen freisetzen würden, führt der Einsatz von Sekundärbrennstoffen insgesamt zu einer Verminderung der  $\text{CO}_2$ -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 bewertet. Eine Substitution der traditionellen fossilen Brennstoffe Braun- und Steinkohle durch andere Brennstoffe mit niedrigeren spezifischen  $\text{CO}_2$ -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. Dabei wird zukünftig der Einsatz biogener Abfallbrennstoffe bzw. solcher Brennstoffe mit biogenen Anteilen eine größere Rolle spielen.

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 CO<sub>2</sub>-Emissionen, die sich aus deren Einsatz ergeben – jedoch größer. Die durch den Stromverbrauch bedingte CO<sub>2</sub>-Emission betrug in den Jahren 2002 bis 2005 zwischen 0,067 und 0,069 t CO<sub>2</sub>/t Zement. In absoluten Zahlen blieben sie mit 2,2 Mio. t nahezu konstant. Eine Eigenstromerzeugung findet in der deutschen Zementindustrie nur in sehr geringem Maße statt.

**Rohstoffbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen**

Bei der Entsäuerung des wichtigsten Rohstoffs Kalkstein (chemisch CaCO<sub>3</sub>) wird CO<sub>2</sub> freigesetzt. Die je Tonne produzierten Klinkers erzeugte rohstoffbedingte CO<sub>2</sub>-Emission hängt von der Rohstoffrezeptur ab, variiert aber nur in geringem Maße. Sie beträgt in Deutschland ca. 0,53 t CO<sub>2</sub>/t Klinker bzw. im Zeitraum von 2002 bis 2005 zwischen 0,401 und 0,428 t CO<sub>2</sub>/t Zement. Die gesamte rohstoffbedingte CO<sub>2</sub>-Emission der deutschen Zementindustrie stieg aufgrund der zunehmenden Exporte zunächst von 12,7 (Stand: 2002) auf 13,93 Mio. t CO<sub>2</sub>/a, um dann wieder auf 12,29 Mio. t CO<sub>2</sub>/a in 2005 abzusinken. Damit ergeben sich für den Berichtszeitraum die in **Tafel II-2** dargestellten spezifischen bzw. absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Eine Verminderung der rohstoffbedingten CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Emissionen der deutschen Zementindustrie für den Zeitraum 1987 bis 2005. Das Basisjahr für die auf die spezifischen energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen umgestellte Selbstverpflichtung der Zementindustrie ist das Jahr 1990. Die Daten von 1987 werden zur Information mit angegeben.

**Tafel II-2: CO<sub>2</sub>-Emissionen der Zementindustrie in den Jahren 2002 bis 2005**

	Absolute CO <sub>2</sub> -Emissionen in Mio. t/a				Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen in t CO <sub>2</sub> /t Zement			
	2002	2003	2004	2005	2002	2003	2004	2005
thermisch bedingt <sup>1)</sup>	5,16	5,20	5,06	4,18	0,168	0,156	0,155	0,132
elektrisch bedingt	2,12	2,22	2,20	2,17	0,069	0,067	0,068	0,068
rohstoffbedingt	12,70	13,37	13,93	12,29	0,413	0,401	0,428	0,406
energiebedingt	7,28	7,42	7,26	6,35	0,237	0,223	0,223	0,200
gesamt	19,98	20,81	21,19	18,64	0,650	0,624	0,651	0,606

<sup>1)</sup> ohne Sekundärbrennstoffe

**Tafel II-3: Spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen der deutschen Zementindustrie (in t CO<sub>2</sub>/t Zement)**

Jahr	Emissionen aus thermischem Energieverbrauch <sup>1)</sup>	Emissionen aus elektrischem Energieverbrauch	Emissionen aus der Kalkstein- entsäuerung	Gesamt
1987	0,317	0,075	0,456	0,848
1990 <sup>2)</sup>	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
2004	0,155	0,068	0,428	0,651
2005	0,132	0,068	0,406	0,606

<sup>1)</sup> ohne Sekundärbrennstoffe

<sup>2)</sup> Basisjahr der freiwilligen Vereinbarung von 2000

**CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren von Sekundärbrennstoffen**

Bei der Ermittlung brennstoffbedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen sind Emissionsfaktoren besonders wichtig, da sie die CO<sub>2</sub>-Mengen beschreiben, die bei der Verbrennung von Brennstoffen freigesetzt werden. Während für Regelbrennstoffe üblicherweise Standardwerte existieren, müssen die Emissionsfaktoren für Ersatzbrennstoffe individuell bestimmt werden. Zur Ermittlung praxisgerechter Emissionsfaktoren für Altreifen hat das Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ) 16 Proben analysiert.

Die Probennahme und analysenfeine Aufbereitung von Altreifen ist mit einem hohen Aufwand verbunden. Deshalb und aufgrund der Tatsache, dass es sich bei Altreifen letztlich um ein mehr oder weniger homogenes Massengut handelt, wurde der Deutschen Emissionshandelsstelle vom FIZ angeboten, über entsprechende Analysen für Altreifen einen festen Emissionsfaktor zu ermitteln.

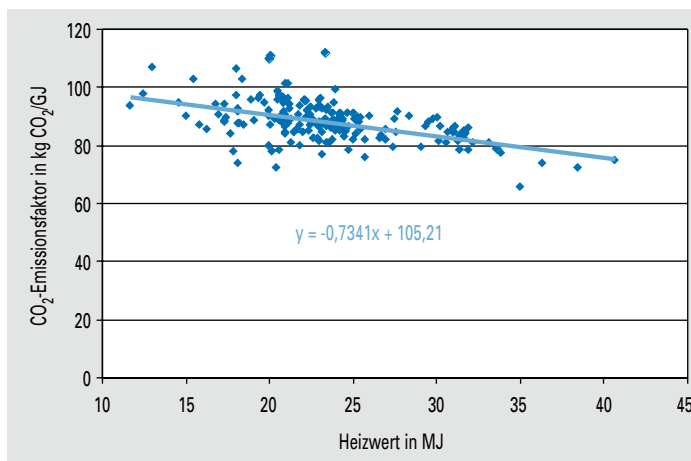
Aus den Altreifen mussten zunächst größere Stücke herausgeschnitten werden (**Bild II-6**). Anschließend wurden diese Reifenabschnitte in einem Schredder verzerkleinert. Dabei gab es insbesondere bei den Lkw-Reifen aufgrund der dicken Stahldrähte in den Seitenwülsten (bis 2 mm Dicke) Schwierigkeiten. Deshalb mussten die Reifenabschnitte in kleine Streifen zersägt und die Stahldrähte manuell entfernt werden. Aus den groben Gummischnittelmischungen wurden alle Metalldrähte mit einem Magneten händisch entfernt. Diese Mischfraktionen aus Gummistücken und Kordfäden wurden dann unter Einsatz von Trockeneis versprödet und einer Schneidmühle zugeführt. Da die Proben für die Analysen sehr fein aufbereitet werden müssen, wurde das Granulat erneut versprödet, diesmal mit flüssigem Stickstoff, und mithilfe einer Ultrazentrifugalmühle auf die erforderliche Feinheit gebracht. Die ausführliche Beschreibung der Probenpräparation zeigt, dass ein derartiger Aufwand im täglichen Betriebsablauf nicht möglich ist.



**Bild II-6:**  
Geschnittene  
Altreifenproben

**Tafel II-4: Ergebnisse der Altreifenuntersuchungen**

	Pkw-Reifen	Lkw-Reifen	Altreifen gesamt
Eisenanteil in %	12,9	25,3	16,8
C-Gehalt in %	70,7	61,9	68,0
Heizwert in kJ/kg (trocken)	29 208	25 908	28 177
Emissionsfaktor in t CO <sub>2</sub> /t	2,59	2,27	2,49
Emissionsfaktor in CO <sub>2</sub> /GJ	0,089	0,088	0,088
Anteil biogener Kohlenstoff in %	23	31	25,5



**Bild II-7: CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor von aufbereiteten Industrie- und Gewerbeabfällen**

Insgesamt wurden zehn Pkw-Reifen, eine Reifenschnitzel-Mischprobe sowie fünf Lkw-Reifen untersucht (**Tafel II-4**). Werden die Emissionsfaktoren, wie im Allgemeinen üblich, auf den Heizwert bezogen, so ergeben sich nah beieinander liegende Werte (Pkw-Reifen 0,089 t CO<sub>2</sub>/GJ, Lkw-Reifen 0,088 t CO<sub>2</sub>/GJ). Bezogen auf die Gesamtmenge beträgt die Standardabweichung nur 0,003 t CO<sub>2</sub>/GJ, entsprechend 3,7 %. Diese geringe Streubreite zeigt, dass es aus fachlicher Sicht gerechtfertigt ist, das Emissionsverhalten der Altreifen über einen festen Standardemissionsfaktor

zu beschreiben. Der so ermittelte Wert konnte in Abstimmung mit den nationalen Behörden von den Zementwerksbetreibern zur Erstellung der CO<sub>2</sub>-Berichte verwendet werden.

**Biogener Kohlenstoffanteil**

Ein weiterer wichtiger Parameter zur Charakterisierung der CO<sub>2</sub>-Emission aus Ersatzbrennstoffen ist der Anteil an biogenem Kohlenstoff. Für CO<sub>2</sub> aus biogenem Kohlenstoff wird per Definition ein Emissionsfaktor von Null angesetzt. Grundsätzlich werden derzeit europäisch

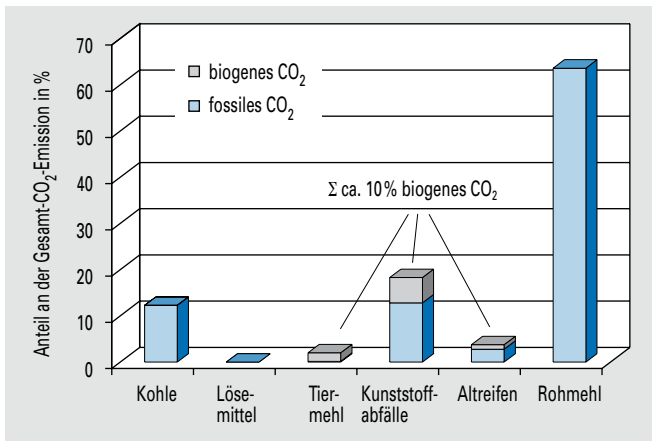
zwei unterschiedliche Möglichkeiten zur Ermittlung des Biomasseanteils in Ersatzbrennstoffen untersucht: Die Methode des selektiven Aufschlusses basiert auf einer nasschemischen Analyse. Das Verfahren, das inzwischen den europäischen Normungsprozess durchlaufen hat, ist allerdings nur für bestimmte Brennstoffe geeignet. Für Altreifen, die zu einem beträchtlichen Teil aus Naturkautschuk und damit aus Biomasse bestehen können, ist das Verfahren nicht anwendbar.

Einer österreichischen Studie zur Folge bestehen Autoreifen durchschnittlich zu 27 % aus biogenem Material. Dieser Wert beruht auf einer Abfrage der Rezepturen für die Herstellung von Reifen bei den Reifenproduzenten. Die Naturkautschukanteile in Pkw-Reifen sind demnach in der Regel etwas geringer als die in Lkw-Reifen, die eine weichere Mischung erfordern. Ein Gehalt von 27 %, der sich aus dem gewichteten Einsatz von Pkw- und Lkw-Reifen ergab, wurde sowohl in Österreich auch als in Deutschland im Rahmen des Emissionshandels grundsätzlich anerkannt.

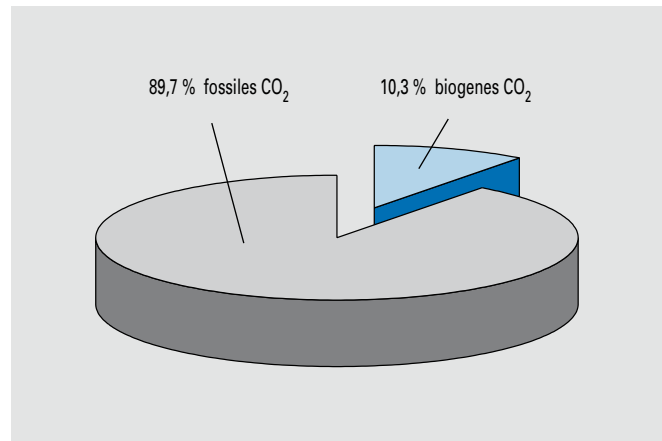
Um diese Werte zu überprüfen, hat das Forschungsinstitut der Zementindustrie die oben beschriebenen Altreifenproben mithilfe der <sup>14</sup>C-Methode auch auf ihre Anteile an biogenem Kohlenstoff analysieren lassen. Wie ebenfalls aus **Tafel II-4** hervorgeht, wiesen die untersuchten Pkw-Reifen im Durchschnitt einen Anteil an biogenem Kohlenstoff bezogen auf den Gesamtkohlenstoff von 23 % sowie Lkw-Reifen von 31 % auf. Insgesamt ergab sich ein durchschnittlicher Anteil von 25,5 %. Damit wird die österreichische Studie im Wesentlichen bestätigt.

**Emissionsfaktor von aufbereiteten Industrie- und Gewerbeabfällen**

Im Jahr 2005 hat das Forschungsinstitut Analysedaten aus den deutschen Zementwerken zusammengetragen. Von besonderem Interesse war dabei die Ermittlung von Emissionsfaktoren von aufbereiteten Industrie- und Gewerbeabfällen. Diese Sekundärbrennstoffe stellen inzwischen die größte Fraktion an Ersatzbrennstoffen der deutschen Zementindustrie dar. Ziel der Untersuchung war, zu ermitteln, inwieweit auch für diese eher heterogenen Brennstoffe gegebenenfalls zukünftig Standardemissionsfaktoren festgelegt werden können. Hierzu wäre eine statistisch abgesicherte Datenbasis sowie eine vertretbare Streuung der Werte erforderlich. **Bild II-7** zeigt den CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor inklusive des biogenen Anteils in Abhängigkeit vom Heizwert von insgesamt



**Bild II-8:** Anteil des Rohmehls und der Brennstoffe an der Gesamt-CO<sub>2</sub>-Emission sowie Aufteilung in fossilen und biogenen Anteil



**Bild II-9:** Prozentuale Aufteilung der Gesamt-CO<sub>2</sub>-Emission in fossilen und biogenen Anteil auf Grundlage einer Emissionsmessung

185 Sekundärbrennstoffproben. Wie aus dem Bild hervorgeht, wurde eine gewisse Abhängigkeit des Emissionsfaktors vom Heizwert festgestellt. Obwohl die Standardabweichung bei nur ca. 8 % lag, zeigt das Bild, dass die Streuung im Einzelfall jedoch deutlich größer sein kann. Eine entsprechende Auswertung bezüglich der biogenen Anteile liegt bisher nicht vor. Die Erfahrungen der 1. Handelsperiode zeigen jedoch, dass diese sehr stark schwanken können. So wurden Werte zwischen 5 und 50 % ermittelt.

### Bestimmung biogener CO<sub>2</sub>-Emissionen

Ein wichtiger Parameter zur Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen ist der Anteil an biogenem Kohlenstoff. Als „biogen“ wird der Kohlenstoff bezeichnet, der in Pflanzen bzw. lebenden Organismen enthalten ist. Im Rahmen des Emissionsrechthehandels wird für CO<sub>2</sub> aus biogenem Kohlenstoff ein Emissionsfaktor von Null angesetzt. Biomassebrennstoffe gelten damit als CO<sub>2</sub>-neutral.

Solche Biomassebrennstoffe sind beispielsweise Altholz, Klärschlamm oder Tiermehl. Je nach Herkunft und Zusammensetzung können auch Papierreststoffe, Textilien oder aufbereitete Industrie- und Gewerbeabfälle einen erheblichen Anteil an biogenem Kohlenstoff aufweisen.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens der European Cement Research Academy (ecra) werden derzeit verschiedene Möglichkeiten untersucht, um den Biomasseanteil in den typischerweise in Drehofenanlagen der Zementindustrie eingesetzten Brennstoffen zu ermitteln. Prinzipiell sind zwei Vorgehensweisen denkbar:

1. Input-Messung: Sämtliche Einsatzstoffe, d. h. Roh- und Brennstoffe werden auf ihren Gehalt an biogenem Kohlenstoff analysiert. Mit einer Verbrennungsrechnung wird die biogene CO<sub>2</sub>-Emissionsfracht ermittelt.
2. Output-Messung: Die biogene CO<sub>2</sub>-Emissionskonzentration wird direkt am Kamin gemessen und die biogene CO<sub>2</sub>-Emissionsfracht errechnet.

Mangels einer geeigneten Alternative wird bisher praktisch ausschließlich die Methode der Input-Messung praktiziert. Ein Nachteil ist dabei jedoch, dass alle Einsatzstoffe im Beurteilungszeitraum überwacht werden müssen, insbesondere wenn die Gehalte an biogenem Kohlenstoff in den einzelnen Stoffen schwanken. Der Untersuchungsaufwand ist dementsprechend hoch.

Bei der zur Bestimmung des biogenen Kohlenstoffanteils in Feststoffen überwiegend angewendete Methode des selektiven Aufschlusses handelt es sich um ein nasschemisches Verfahren, das allerdings nur für bestimmte Brennstoffe geeignet ist. So ist die Methode des selektiven Aufschlusses beispielsweise nicht für Altreifen, die zu einem beträchtlichen Anteil aus Naturkautschuk und damit aus Biomasse bestehen können, nicht anwendbar. Gleiches gilt auch für flüssige Brennstoffe sowie für Abfälle mit einem größeren Anteil Gummi, Wolle, Viskose oder bestimmten Kunststoffen.

Als Alternative zum selektiven Aufschluss wird das so genannte <sup>14</sup>C-Verfahren angewendet. Diese Methode wird in der Archäologie zur Altersbestimmung von organischen Materialien eingesetzt und

beruht auf der Ermittlung des Verhältnisses zwischen den beiden Kohlenstoffisotopen <sup>12</sup>C und <sup>14</sup>C. <sup>14</sup>C zerfällt mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren und ist in fossilen Brennstoffen nicht mehr enthalten. „Junge“, erneuerbare Brennstoffe enthalten dagegen das <sup>14</sup>C-Isotop. Sein relativer Anteil in biogener Masse ist nahezu konstant und beträgt 1 ng/kg. Vorteil dieser Methode ist es zudem, dass sowohl feste als auch flüssige Brennstoffe untersucht werden können, und zwar unabhängig von ihrer Zusammensetzung.

Basierend auf den bisherigen analytischen Erfahrungen wird im Rahmen des ecra-Forschungsvorhabens in Zusammenarbeit mit einem österreichischen und einem niederländischen Institut versucht, die <sup>14</sup>C-Bestimmung auf Emissionsproben, die dicht am Kamin gewonnen wurden, zu übertragen. Durch diese Output-Messung könnte der Untersuchungsaufwand erheblich reduziert werden, da für den Beurteilungszeitraum jeweils nur eine Probe anfällt. Die Idee, brennstoffbedingte biogene <sup>14</sup>CO<sub>2</sub>-Emissionen mit einer Output-Messung am Kamin zu bestimmen, koppelt teilweise an das Verfahren an, das bereits für die Untersuchung von Feststoffen eingesetzt wird. Eine Weiterentwicklung ist insbesondere im Hinblick auf die erforderliche Nachweisempfindlichkeit erforderlich. Ergebnisse einer ersten Untersuchung sind in den **Bildern II-8** und **II-9** dargestellt, wobei Bild II-8 die Ergebnisse der Brennstoffbeprobung und Bild II-9 das Resultat aus der direkten Messung am Kamin zeigt. Alle Brennstoffe wurden über einen Zeitraum von mehreren Tagen beprobt und auf ihren Gehalt an biogenem Kohlenstoff untersucht.



Bild II-10: Altreifenlager



Bild II-11: Dosierbandwaage für feste Sekundärbrennstoffe

Bei Drehofenanlagen der Zementindustrie stammen ca. zwei Drittel der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Entsäuerung des Rohmaterials und sind daher genauso wie brennstoffbedingtes CO<sub>2</sub> aus Kohle als „fossil“ einzustufen. Dagegen weisen verschiedene Sekundärbrennstoffe je nach Ursprung und Zusammensetzung relevante Anteile an biogenem Kohlenstoff auf. Im vorliegenden Beispiel ergab die Brennstoffuntersuchung sowie die daraus resultierende Verbrennungsrechnung, dass ca. 10 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen dieser Ofenanlage als „biogen“ einzustufen waren. Im gleichen Zeitraum wurden CO<sub>2</sub>-Emissionsproben am Kamin entnommen, die das Ergebnis der Bilanzierung bestätigten.

### CO<sub>2</sub>-Berichterstattung und Verifizierung

Mit Beginn des CO<sub>2</sub>-Emissionshandels sind die Betreiber von Ofenanlagen zur Herstellung von Zementklinker mit einer Produktionskapazität größer 500 t/d verpflichtet, die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu ermitteln und die Höhe der tatsächlichen Emissionen jährlich zu berichten. Die Zertifizierungsstelle für Managementsysteme (FIZ-Zert) des Forschungsinstituts der Zementindustrie hat im Rahmen der CO<sub>2</sub>-Berichterstattung in den Jahren 2005 und 2006 jeweils ca. 40 Standorte der Zement- und Kalkindustrie auditiert und die ermittelten CO<sub>2</sub>-Mengen verifiziert. Grundlage der CO<sub>2</sub>-Berichterstattung sind die so genannten Monitoring-Konzepte, in denen standortspezifisch festgelegt ist, wie die Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Emissionen erfolgt. Diese Konzepte sind, wenn die Bestimmungsmethoden von den EU-Monitoring-Leitlinien abweichen, von den jeweiligen Landesbehörden zu billigen. Aufgrund der in den Monitoring-Leitlinien genannten, z. T. sehr „praxisfremden“ Methoden bedurften vom Grundsatz her

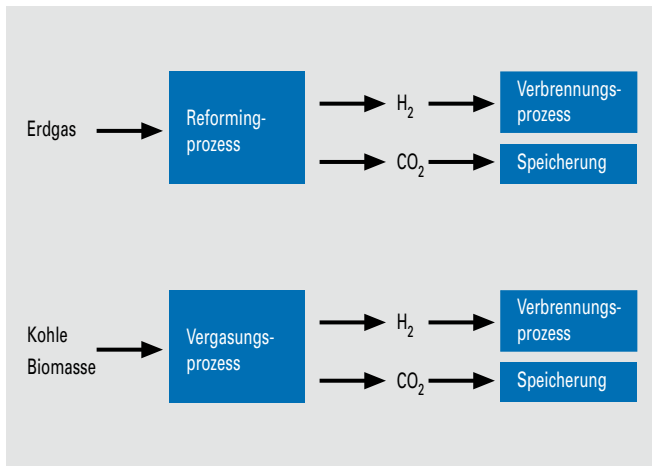
alle vorgelegten Monitoring-Konzepte einer solchen Billigung. Insbesondere die zur Ermittlung der prozessbedingten Emissionen in den Monitoring-Leitlinien genannten Methoden wären nur mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand möglich gewesen.

Das Forschungsinstitut hatte daher vorgeschlagen, die prozessbedingten Emissionen, d.h. ca. zwei Drittel der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen beim Klinkerbrennprozess, durch die bewährte kombinierte Methode aus der Bilanzierung des Prozessinputs und der Rückrechnung aus dem Zementversand zu bestimmen. Gemäß den FAQs (Frequently Asked Questions) der Deutschen Emissionshandelsstelle (DEHST) ist die Vorgehensweise mittlerweile akzeptiert worden. Diese Methode wird in nahezu allen Zementwerksstandorten zur Ermittlung der Klinkermenge angewandt und von den zuständigen Behörden gebilligt.

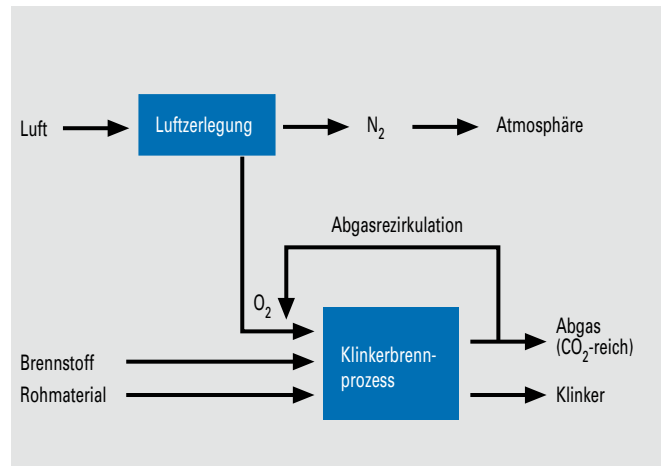
In einigen Bundesländern wurden die Anlagenbetreiber bei der Ausarbeitung der Konzepte von den Landesbehörden sehr kompetent unterstützt. Die Billigung der Konzepte erfolgte in der Regel sehr zeitnah, teilweise nach Einarbeitung einiger Änderungen. In anderen Ländern (u. a. in Bayern) akzeptierten die Landesbehörden jedoch nicht die im Treibhausgasemissionshandelsgesetz (TEHG) festgelegte Zuständigkeit für die Prüfung der Monitoring-Konzepte. Da die Deutsche Emissionshandelsstelle gemäß TEHG die Prüfung formal nicht vornehmen darf, blieb den Betreibern nur die Möglichkeit, ihre Monitoring-Konzepte detailliert auszuarbeiten und abschließend von den Sachverständigen auf Konformität mit den Monitoring-Leitlinien bzw. den FAQs überprüfen zu lassen.

Als Hilfestellung für die Zementwerksbetreiber hat die DEHST ein so genanntes Muster-Monitoring-Konzept entwickelt. Allerdings erschien dieses Muster erst Ende des Jahres 2005. Demzufolge stellte sich bei der Überprüfung von Konzepten durch die Sachverständigen im ersten Berichtsjahr heraus, dass in einigen Konzepten – obwohl z. T. bereits behördlich gebilligt – formale Angaben, wie z. B. Angaben zur Genauigkeit von Waagen, die geforderte Zuordnung zu den Genauigkeitsebenen der EU-Leitlinien oder aber ein detailliertes Verfahrensfließbild fehlten. Auf Anraten der Sachverständigen wurden die Konzepte in diesen Fällen – soweit nötig – an das Muster-Monitoring-Konzept angepasst und der Behörde zur nochmaligen Billigung vorgelegt.

Bei der Prüfung der ermittelten CO<sub>2</sub>-Mengen wurden vom Sachverständigen sowohl das Monitoring-Konzept und die Umsetzung des Konzepts in der betrieblichen Praxis als auch die eigentliche Emissionsberichterstattung begutachtet. Insbesondere wurde dabei geprüft, ob die in dem Monitoring-Konzept beschriebenen Bestimmungsmethoden in den Werken umgesetzt werden. Neben der Überprüfung der jeweiligen Probenahmen wurden die Wartung und Kalibrierung der notwendigen Waagen sowie die jeweiligen Lagermengen (**Bilder II-10** und **II-11**) genauso begutachtet, wie die in den Werkslaboratorien oder in externen Laboratorien durchgeführten Analysen. Heterogene Brennstoffe wurden detaillierter geprüft als homogene Stoffe. Ein Schwerpunkt der Begutachtung lag auf der Bestimmung der biogenen Anteile in den Brennstoffen, außerdem wurden die angewandten Bestimmungsmethoden explizit begutachtet. Ein besonderes Augenmerk lag auch auf der Datenerfassung



**Bild II-12:** Schematische Darstellung der Pre-combustion-Technologie zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung



**Bild II-13:** Schematische Darstellung der Oxyfuel-Technologie zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung

und der Qualitätssicherung. Die EU-Monitoring-Leitlinien fordern, dass nicht nur die Mengenermittlungen stimmen, sondern dass auch die Aufzeichnung der Daten nachvollziehbar und belegbar sein muss.

Im Vergleich zur Berichterstattung für die Zuteilungsanträge wurde für die Emissionsberichte eine wesentlich einfachere und anwenderfreundlichere Software eingeführt. Sowohl die Eintragung der ermittelten Daten als auch deren Überprüfung verlief mit der neuen Software, dem so genannten „Formular-Management-System“, weitestgehend störungsfrei.

### Carbon Capture and Storage

Die traditionellen Möglichkeiten zur Minderung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen sind seit vielen Jahren Gegenstand der Bestrebungen der Zementindustrie. Die verfahrenstechnischen Potenziale im Hinblick auf Verbesserung der Energieeffizienz sind allerdings heute weitgehend erschöpft und die Möglichkeiten der Brennstoff- bzw. Klinkersubstitution sind aus technischen bzw. aus Qualitätsgründen limitiert. Langfristig strebt die Politik weltweit deutlich weiter gehende Minderungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen an. Da Zement auf absehbare Zeit ein nicht verzichtbarer Baustoff ist, stellt sich die Frage, inwieweit er mittel- oder langfristig mit deutlich geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen als heute produziert werden kann.

Zurzeit werden weltweit unterschiedliche Möglichkeiten zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von industriellen Prozessen erforscht. Die möglichen Techniken zu Abscheidung, Transport und Lagerung des CO<sub>2</sub> werden unter dem Begriff „CCS“ (Carbon Capture and Storage) zusammengefasst. Zurzeit sind diese Technologien

vor allem für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus den Abgasen von Kraftwerken in der Diskussion. Die Europäische Union hat ein umfassendes Forschungsprogramm zur Untersuchung der Möglichkeiten der CCS-Anwendung in der Energiewirtschaft begonnen. Bisher existieren jedoch weltweit keine Erfahrungen mit der Anwendung dieser Technologie bei der Zementklinkerherstellung.

Eine Abtrennung von CO<sub>2</sub> aus Rauchgasströmen und anschließender Lagerung erscheint grundsätzlich nur bei großen Quellen, wie z. B. Kraftwerken, Stahl- oder Zementwerken sinnvoll, da der hohe technische und finanzielle Aufwand durch hohe Emissionseinsparungen belohnt würde. Eine Deponierung des CO<sub>2</sub> könnte in nicht atmosphärischen Senken erfolgen, z. B. durch Lagerung in den Ozeanen, in leeren Öl- und Erdgasfeldern, unbrauchbaren Kohleflözen oder -minen. Auch eine Verwendung des CO<sub>2</sub> in anderen Industriebereichen, z. B. in der chemischen und der Lebensmittelindustrie, wird untersucht. Viele für CCS-Projekte erforderliche Systemkomponenten existieren bereits heute – sei es für Abscheidung, Transport und Lagerung von CO<sub>2</sub> –, doch gibt es nur sehr wenige Beispiele für großtechnische und kommerzielle Anwendungen.

Die größten technischen Herausforderungen bestehen in der Abscheidung des CO<sub>2</sub>. Diese ist grundsätzlich auf verschiedene Weisen möglich:

- Abtrennen des CO<sub>2</sub> vor der Verbrennung (Pre-Combustion Capture),
- Oxyfuel-Technologie sowie
- Abscheidung nach der Verbrennung (Post-Combustion Capture).

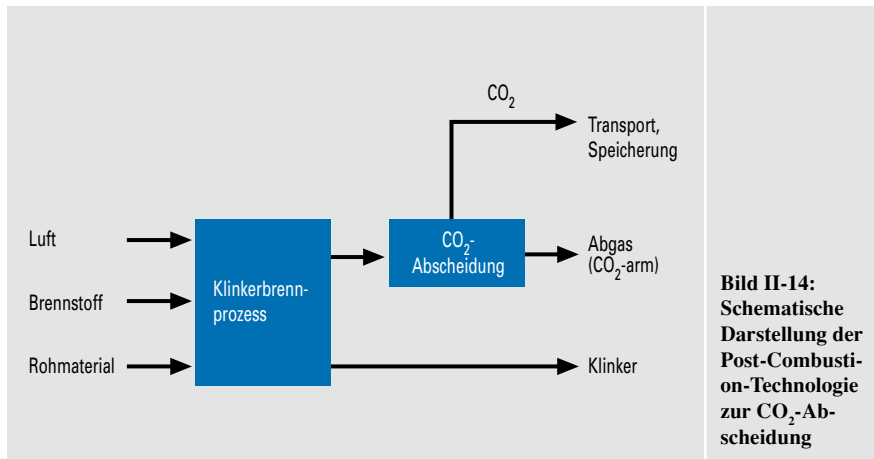
### Pre-Combustion-Technologie

Bei dem Pre-Combustion-Prozess wird entweder durch Kohlevergasung oder durch einen Reformierprozess aus Erdgas ein Synthesegas erzeugt. Dabei handelt es sich um ein Gasgemisch aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff. Der Energiebedarf dieser endothermen Reaktion wird durch Teilverbrennung des fossilen Brennstoffs gedeckt. Das Abtrennen des CO aus dem Synthesegas erfolgt durch Umsetzung mit Wasserdampf in einer exothermen Reaktion unter Neubildung von Wasserstoff und CO<sub>2</sub>. Das CO<sub>2</sub> wird anschließend abgetrennt und der Wasserstoff als Brennstoff weiter verwendet.

Für die Anwendung dieser Technologie bei der Zementherstellung wäre insbesondere von Bedeutung, inwieweit Wasserstoff als Brennstoff im Klinkerbrennprozess verwendet werden kann. Die Brennstoffeigenschaften von Wasserstoff sind vollkommen verschieden von den heute in der Zementindustrie eingesetzten Brennstoffen. Da er nicht in reiner Form eingesetzt werden kann, müsste er mit einem Inertgas zunächst gemischt und dann dem Brennprozess zugeführt werden (**Bild II-12**). Darüber hinaus unterscheiden sich die Strahlungseigenschaften einer Wasserstoffflamme grundsätzlich von denen einer Kohlenstaub- oder Sekundärbrennstoffflamme. Dies hätte signifikante Auswirkungen auf die Wärmeübertragung in der Sinterzone und damit auf das entstehende Temperaturprofil im Drehofen. Somit müsste eine vollständig neue Feuerungstechnik für den Klinkerbrennprozess entwickelt werden.

### Oxyfuel-Technik

Bei der Oxyfuel-Technologie erfolgt die Verbrennung nicht mit Luft, sondern mit



reinem Sauerstoff. Die Anreicherung der Verbrennungsluft mit Sauerstoff ist in der Zementindustrie durchaus bekannt. Zur Steigerung des Ofendurchsatzes oder zur Förderung der Verbrennung wurden geringfügige Anreicherungen z.B. auf 25 % O<sub>2</sub> in der Verbrennungsluft realisiert. Im Hinblick auf die Erzeugung eines möglichst CO<sub>2</sub>-reichen Abgases wäre allerdings eine Verbrennung mit möglichst hoher Sauerstoffkonzentration erstrebenswert. Hierzu müsste zunächst reiner Sauerstoff in einer Luftzerlegungsanlage erzeugt und zwischengelagert werden. Da die Verbrennung mit reinem Sauerstoff zu hohen Verbrennungstemperaturen in der Sinterzone führen würde, müsste ein erheblicher Teil des Rauchgases in den Verbrennungsprozess zurückgeführt und damit die Verbrennungstemperatur eingestellt werden (**Bild II-13**). Problematisch wäre u.a. eine weitgehende Abdichtung des Klinkerbrennprozesses. Aufgrund der Übergänge von statischen auf bewegte Teile, wie z.B. am Ofenkopf oder Ofenlauf, ist eine vollständige Abdichtung des Prozesses nicht möglich.

Das durch die Verbrennung mit nahezu reinem Sauerstoff entstehende CO<sub>2</sub>-reiche Abgas könnte entweder direkt verflüssigt oder zunächst über eine weitere Capture-Technologie abgetrennt werden, bevor es zur Speicherung abtransportiert wird.

Auch bei der Verwendung der Oxyfuel-Technologie beim Klinkerbrennprozess wäre eine umfassende Anpassung des Brennprozesses erforderlich. Die Oxyfuel-Technologie wird heute bereits in der Glasindustrie eingesetzt und Pilot- bzw. Demonstrationsanlagen für die Stromerzeugung sind in der Planung.

### Post-Combustion-Technologie

Bei den Post-Combustion-Verfahren handelt es sich um eine Rauchgasreinigung, d.h. CO<sub>2</sub> wird nach dem Verbrennungsprozess mittels einer klassischen End-of-pipe-Maßnahme abgetrennt. Der Vorteil dieser Verfahren ist, dass sie grundsätzlich verschiedenen industriellen Feuerungsprozessen nachgeschaltet werden können, ohne den Prozess (zumindest stofflich) zu beeinflussen (**Bild II-14**). Der Entwicklungsstand der verschiedenen Post-Combustion-Prozesse ist sehr unterschiedlich: Während für manche Verfahren noch Grundlagenforschung betrieben wird, gibt es für andere bereits Pilotversuche im halbtechnischen Maßstab oder sogar großtechnische industrielle Anwendungen, die meist nur unter sehr engen Randbedingungen möglich sind. In der Diskussion sind heute Adsorptions- und Absorptionsverfahren sowie Membranverfahren. Für all diese Verfahren gilt, dass sie einen erheblichen Aufwand für die Bereitstellung der Sorbenzien sowie für deren Aufbereitung und Kreislaufführung erfordern. Damit verbunden ist ein erheblicher zusätzlicher Energiebedarf, der zunächst die CO<sub>2</sub>-Emissionen erhöht. Deshalb müssen zusätzliche Mengen an Sorbenzien verwendet werden, um sie wieder zu mindern (so genannte „Energy Penalty“). Ein Teil dieser Energie könnte möglicherweise durch Nutzung von Abwärme aus dem Brennprozess gewonnen werden.

Es gibt heutzutage keine quantitativen Berechnungen darüber, wie groß der zusätzliche Energieaufwand bzw. die zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen infolge der Anwendung von Capture-Technologien bei der Zementherstellung wäre. Die für die Energieerzeugung diskutierten Kosten liegen zwischen 30 und 50 €/t CO<sub>2</sub> und sind damit noch deutlich höher als die in der 1. Handelsperiode des CO<sub>2</sub>-Emissionshandels aufgetretenen maximalen Preise von etwa 30 €/t CO<sub>2</sub>.

## Umweltdaten ■

Seit dem Jahr 1998 veröffentlicht der VDZ jährlich die auf einer Umfrage unter nahezu allen deutschen Zementherstellern basierenden „Umweltdaten der deutschen Zementindustrie“. Die jeweils aktuelle Ausgabe steht unter [www.vdz-online.de](http://www.vdz-online.de) im Bereich Publikationen/Umweltdaten als pdf-Datei zum Download zur Verfügung. Zusätzlich können gedruckte Exemplare über die Literaturstelle angefordert werden.

Die Broschüre dokumentiert den Einsatz von Roh- und Brennstoffen zur Klinker- und Zementproduktion. Insbesondere werden die Einsatzmengen der Sekundärstoffe detailliert dargestellt. Der Anteil der Sekundärstoffe am gesamten Brennstoffenergieeinsatz betrug demnach im Jahr 2005 etwa 49 %. Der inhaltliche Schwerpunkt liegt auf den Emissionen über die Ofenabgase der Zementanlagen, die repräsentativ für die deutsche Zementindustrie dargestellt werden können.

Betrachtet werden neben dem Staub auch die Abgaskomponenten NO<sub>x</sub> (**Bild II-15**), SO<sub>2</sub> sowie alle relevanten Spurenelemente und organische Abgasbestandteile. Deren Konzentrationen in den Reingasen werden ebenso wie die damit verbundenen Stofffrachten, das heißt die emittierten Mengen in kg/Jahr, für alle in Deutschland betriebenen Klinkeröfen graphisch dargestellt. Sofern eine Komponente durch eine Messung bestimmbar war, sind eindeutige Angaben sowohl für die Konzentration als auch für die Jahresfracht möglich, deren Genauigkeiten durch die Messunsicherheit beschrieben werden können. Bei nicht abgesicherten Messwerten oder Messungen unterhalb der Nachweisgrenze ist dies jedoch nicht möglich. In diesen Fällen wird in den Bildern keine Emissionskonzentration angegeben. Für die emittierte Fracht kann dann 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 zurzeit bei der Bestimmung der Spurenelementemissionen von Drehofenanlagen der Zementindustrie oft unausweichlich. Die Konzentrationen von Spurenelementen liegen wegen deren Verhalten im Klinkerbrennprozess sowie der hohen Abscheideleistung der Entstaubungsanlagen sehr häufig unter der Nachweisgrenze des Messverfahrens. In **Bild II-16** werden beispielhaft die Emissionskonzentrationen



in mg/m<sup>3</sup> für das Spurenelement Thallium dargestellt. Insgesamt wurden z. B. im Jahr 2005 durch Messungen an 37 Ofenanlagen 108 Werte für die Thallium-Konzentration in den Reingasen ermittelt. Jedoch sind lediglich die zwei abgebildeten Werte (Punkte) größer oder gleich der Nachweisgrenze, die je nach Mess- und Analysenmethode zwischen 0,004 und 0,006 mg/m<sup>3</sup> beträgt (Querbalken). Da beide Messwerte von einer Anlage stammen, kann in **Bild II-17** nur für eine Anlage die Thallium-Fracht über die Konzentrationswerte und den Reingasvolumenstrom (m<sup>3</sup>/Jahr) eindeutig angegeben werden (Dreieck). Für 36 Anlagen müssen die Emissionen über einen angenommenen Konzentrationswert von 0,004 mg/m<sup>3</sup> 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.

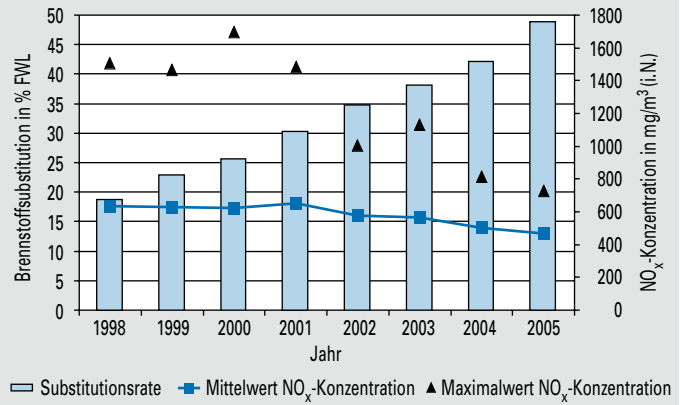
### Minderung gas- und staubförmiger Emissionen ■

#### Stand des SNCR-Verfahrens

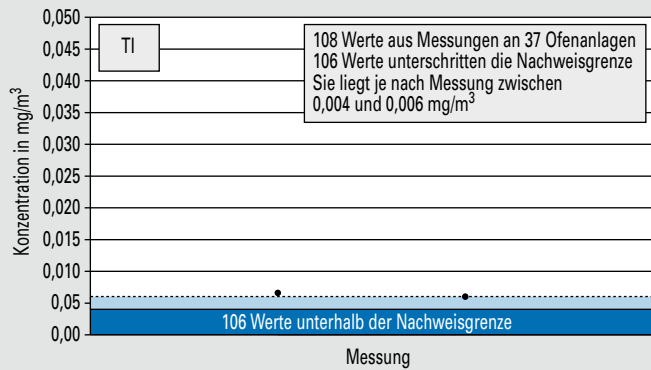
Das SNCR-Verfahren (selektive nicht-katalytische Reduktion) hat in den letzten Jahren eine große Verbreitung in der Zementindustrie gefunden. Mittlerweile wird diese Sekundärmaßnahme zur NO<sub>x</sub>-Minderung an ca. 100 europäischen Drehofenanlagen (davon über 30 in Deutschland) eingesetzt und hat zu einer signifikanten Verminderung der NO<sub>x</sub>-Emissionen beigetragen. Die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des SNCR-Verfahrens können dabei sehr unterschiedlich sein. Insbesondere das NO<sub>x</sub>-Ausgangsniveau und die Höhe des NO<sub>x</sub>-Emissionsgrenzwerts bestimmen die Randbedingungen für die Anwendung dieses Minderungsverfahrens.

In Deutschland gelten für Zementofenanlagen im europäischen Vergleich besonders anspruchsvolle Regelungen zur Begrenzung der NO<sub>x</sub>-Emissionen. Bei Einsatz von Sekundärbrennstoffen soll gemäß der 17. BImSchV bei einer Substitutionsrate > 60 % ein Mischgrenzwert gebildet werden, der zwischen 320 und 200 mg/m<sup>3</sup> liegen kann. Bis zum 30.10.2007 besteht noch eine Übergangsfrist, in der Emissionsgrenzwerte von 500 mg/m<sup>3</sup> (im Tagesmittel) auch bei Substitutionsraten von > 60 % festgelegt werden können. Für viele Anlagen würde eine deutliche Absenkung des NO<sub>x</sub>-Grenzwerts eine große Herausforderung darstellen.

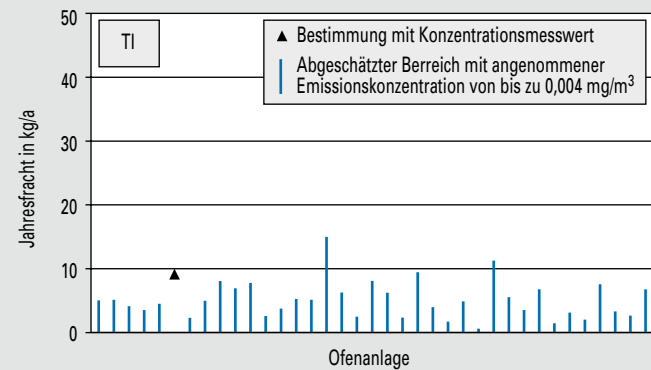
**Bild II-15:** Entwicklung der NO<sub>x</sub>-Emissionen von 1998 bis 2005 mit Darstellung der Brennstoffsubstitution



**Bild II-16:** Messwerte (Jahr 2005) der Thallium-Konzentration im Reingas von 37 Drehofenanlagen



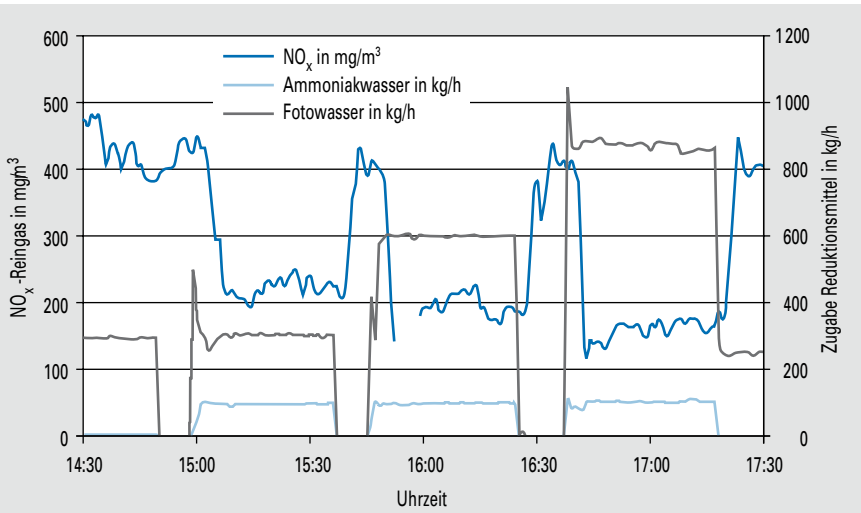
**Bild II-17:** Thallium-Emissionen (Jahresfrachten 2005) von 37 Drehofenanlagen



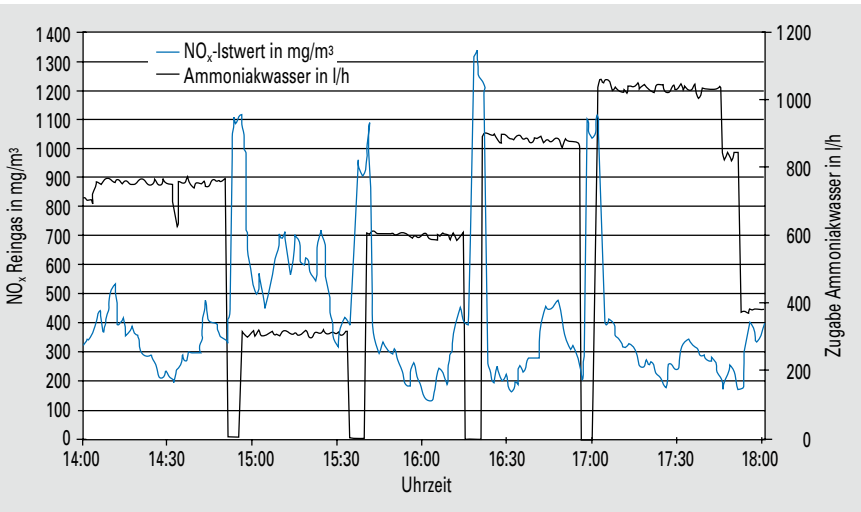
Nach wie vor besteht die grundsätzliche Frage, welches NO<sub>x</sub>-Emissionsniveau mit dem SNCR-Verfahren sicher eingehalten werden kann. In der bisher geltenden Version des europäischen BREF-Dokuments (Best Available Techniques Reference Document) für die Zementindustrie wurde von einem Teil der Expertengruppe zwar ein erreichbares BAT-Niveau von 200 bis 500 mg/m<sup>3</sup> vorgeschlagen, doch diese Festlegung war umstritten und wurde nicht einvernehmlich beschlossen. Vielmehr enthält das BREF-Dokument für NO<sub>x</sub> einen so genannten „split view“, da andere Experten das erreichbare Niveau bei 500 bis 800 mg/m<sup>3</sup> gesehen haben. Im

Zusammenhang mit dem SNCR-Verfahren wurde dabei auch das Problem erhöhter NH<sub>3</sub>-Emissionen bei hohen NO<sub>x</sub>-Minderungsraten thematisiert.

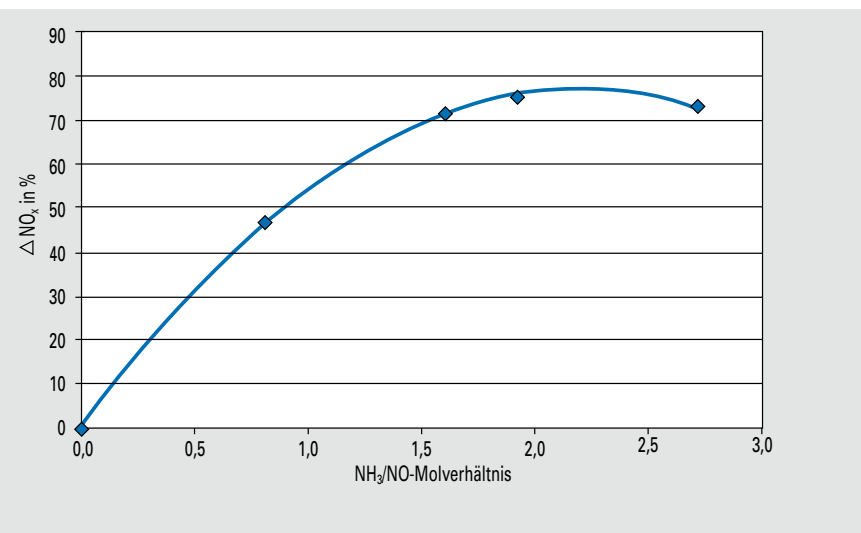
Bei der aktuellen Revision des Zement-BREFs werden derzeit die Betriebserfahrungen mit der Anwendung des SNCR-Verfahrens aus den letzten Jahren zusammengetragen. Die bisher durchgeführten SNCR-Potenzial-Versuche an verschiedenen Ofenanlagen zeigen, dass ein NO<sub>x</sub>-Emissionsniveau von 200 mg/m<sup>3</sup> meist nur dann erreicht werden kann, wenn das Ausgangsniveau bereits sehr niedrig ist. Dies trifft z. B. auf Vorcalcineranlagen zu, wenn



**Bild II-18: Schrittweise Steigerung der Reduktionsmittelzugabe und erreichbares NO<sub>x</sub>-Niveau an einer Voralcinieranlage**



**Bild II-19: NO<sub>x</sub>-Emissionen in Abhängigkeit von der Ammoniakzugabe an einer Ofenanlage mit Zyklonvorwärmer**



**Bild II-20: Erreichbare NO<sub>x</sub>-Minderungsrate bei zunehmendem NH<sub>3</sub>/NO-Molverhältnis**

diese mit einer gestuften Zweitfeuerung ein NO<sub>x</sub>-Niveau von 500 mg/m<sup>3</sup> unterschreiten und durch die zusätzliche Anwendung der SNCR-Technik mit NO<sub>x</sub>-Minderungsraten von 50 bis 60 % in den angestrebten Emissionsbereich kommen können. Durch die lange Verweilzeit der Reaktanden im geeigneten „Temperaturfenster“ wird eine hohe Umsetzung ermöglicht, sodass nur ein geringer NH<sub>3</sub>-Schlupf auftritt. **Bild II-18** zeigt den Fall einer solchen Ofenanlage, bei der ohne Eindüsung eines Reduktionsmittels zeitweise ein NO<sub>x</sub>-Ausgangsniveau < 500 mg/m<sup>3</sup> gegeben ist (siehe NO<sub>x</sub>-Emissionen bei Abschalten der Eindüsung). Bei einer zunehmenden Reduktionsmittelaufgabe (schrittweise Steigerung der Photowassereindüsung bei gleich bleibender Aufgabe von Ammoniakwasser) resultierten NO<sub>x</sub>-Emissionen unter 200 mg/m<sup>3</sup>. Die maximale NO<sub>x</sub>-Minderungsrate lag in diesem Fall bei knapp 65 % mit Werten für das NH<sub>3</sub>/NO-Molverhältnis zwischen 1,4 und 1,9. Die NH<sub>3</sub>-Emissionen blieben dabei vernachlässigbar gering mit Konzentrationen ≤ 5 mg/m<sup>3</sup> im Verbundbetrieb.

Bei vielen konventionellen Ofenanlagen (Ofenanlagen mit Zyklonvorwärmer oder Rostvorwärmer) sind weniger günstige Bedingungen vorhanden mit einem räumlich sehr beschränkten Bereich für die Eindüsung des Reduktionsmittels. Somit ist eine optimale Verteilung des Reduktionsmittels und eine ausreichende Reaktionsstrecke nicht immer gegeben. Zur Einstellung hoher Minderungsraten ist daher in der Regel eine deutlich überstöchiometrische Zugabe des Reduktionsmittels erforderlich. **Bild II-19** zeigt die Ergebnisse eines SNCR-Versuchs an einer Ofenanlage mit Zyklonvorwärmer, an der sich zeitweise ein hohes NO<sub>x</sub>-Ausgangsniveau von über 1000 mg/m<sup>3</sup> einstellte. Selbst mit hohen Eindüseraten von 900 oder 1000 Litern 25%igem Ammoniakwasser pro Stunde konnte ein NO<sub>x</sub>-Niveau von 200 mg/m<sup>3</sup> nicht erreicht werden. Die zugehörigen NO<sub>x</sub>-Minderungsraten in Abhängigkeit vom NH<sub>3</sub>/NO-Molverhältnis sind in **Bild II-20** dargestellt. Man erkennt, dass unter diesen Bedingungen die maximale NO<sub>x</sub>-Minderung bei ca. 75 % lag und sich auch durch ein höheres NH<sub>3</sub>/NO-Molverhältnis nicht verbessern ließ. Die dabei auftretenden NH<sub>3</sub>-Emissionen (im Direktbetrieb) lagen bei über 200 mg/m<sup>3</sup>. Die bei diesem Versuch gegebene Lanzenkonfiguration erwies sich somit aufgrund des hohen NH<sub>3</sub>-Schlupfs als ungünstig und gab Anlass zu einer weiteren Optimierung der SNCR-Anlage.

In dieser Art wurden in den letzten Jahren verstärkt Betriebsversuche zur Optimierung der Eindüsekonfiguration durchgeführt, wodurch in manchen Fällen die Effizienz des SNCR-Verfahrens verbessert und der  $\text{NH}_3$ -Schlupf verringert werden konnte.

Eine besondere Bedeutung bekommt die Höhe des  $\text{NH}_3$ -Schlupfs dadurch, dass einzelne Genehmigungsbehörden einen Emissionsgrenzwert für  $\text{NH}_3$  festlegen wollen. Für Drehöfen der Zementindustrie ist dies allerdings nicht ohne Weiteres möglich. Bei der Novellierung der TA Luft und der 17. BImSchV wurde ausdrücklich auf die Festlegung eines  $\text{NH}_3$ -Grenzwerts für Ofenanlagen zur Herstellung von Zementklinker verzichtet. Ein Grund für diese Entscheidung waren u. a. die rohmaterialbedingten  $\text{NH}_3$ -Emissionen, die in manchen Fällen im Bereich des allgemeinen  $\text{NH}_3$ -Grenzwerts der TA Luft ( $30 \text{ mg/m}^3$ ) oder im Direktbetrieb sogar deutlich höher liegen können.

Als alternative Sekundärmaßnahme zur Reduktion von  $\text{NO}_x$  kommt grundsätzlich auch die selektive katalytische Reduktion (SCR) in Betracht. In Kraftwerken und Müllverbrennungsanlagen stellt dieses Minderungsverfahren den Stand der Technik dar. In der Zementindustrie wurde letztes Jahr jedoch erst die weltweit zweite Anlage in einem italienischen Werk installiert. Die ersten Betriebserfahrungen werden zurzeit gesammelt. Nach wie vor kann dieses Verfahren aus Sicht der Zementindustrie nicht als Stand der Technik (bzw. BAT) bezeichnet werden, da Betriebserfahrungen in begrenztem Umfang nur von einer Anlage in Deutschland vorliegen. Im Vergleich zum SNCR-Verfahren sind die Investitionskosten deutlich höher und auch die spezifischen Gesamtkosten liegen über denen des SNCR-Verfahrens.

### Gestufte Verbrennung im Calcinator – Kombination von SNCR mit gestufter Verbrennung

Für Zementwerke gilt nach TA Luft ein anspruchsvoller  $\text{NO}_x$ -Emissionsgrenzwert von  $0,50 \text{ g/m}^3$ , angegeben als  $\text{NO}_2$ . Für Zementwerke, die Abfälle als Ersatzbrennstoffe einsetzen, gelten zudem die Regelungen der 17. BImSchV. Wird in diesen Anlagen mehr als 60 % des Brennstoffenergiebedarfs durch die Verbrennung von Abfällen gedeckt, so gelten sogar noch strengere Regeln bezüglich der  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen im Abgas. Um den steigenden Anforderungen hinsichtlich der Emissionsreduzierung nachkommen zu können, sind Zementwerke darauf angewiesen,

geeignete  $\text{NO}_x$ -Minderungstechniken anzuwenden. Dabei sind Primärmaßnahmen zur  $\text{NO}_x$ -Minderung in der Hauptfeuerung von Drehofenanlagen der Zementindustrie weitgehend ausgeschöpft. Bei Vorcalcinieranlagen mit Tertiärluftleitung besteht als zusätzliche Primärmaßnahme die Möglichkeit zur  $\text{NO}_x$ -Minderung durch gestufte Feuerungsführung im Calcinator.

Im Rahmen eines abgeschlossenen AiF-Forschungsvorhabens wurden die mit diesem Verfahren erreichbaren  $\text{NO}_x$ -Minderungspotenziale intensiv untersucht und Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt. Die Ergebnisse zeigten, dass bei vielen Vorcalcinieranlagen allein mit diesen Maßnahmen ein Emissionsniveau von weniger als  $500 \text{ mg NO}_x/\text{m}^3$  nicht unter allen Betriebsbedingungen gewährleistet werden konnte.

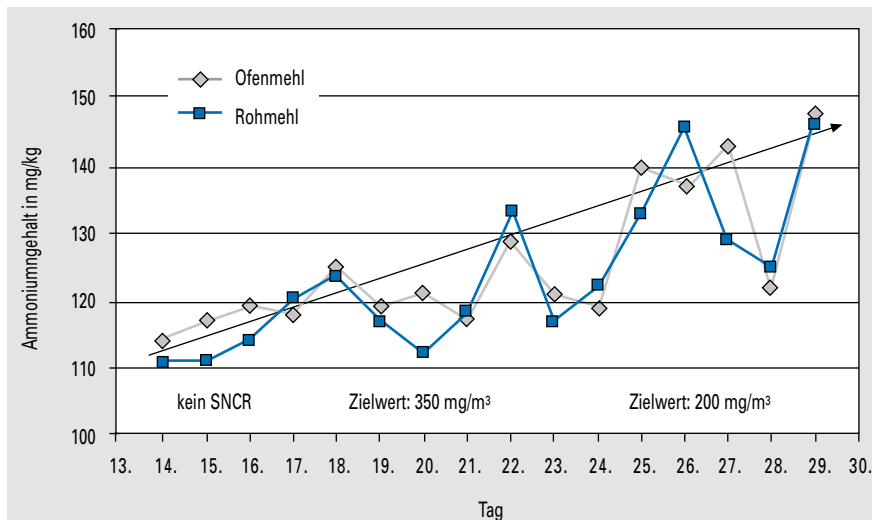
Ziel des hier vorgestellten Forschungsvorhabens war es deshalb, die  $\text{NO}_x$ -Minderung im Calcinator durch zusätzliche Anwendung des SNCR-Verfahrens zu erhöhen und gleichzeitig einen vollständigen Ausbrand der Brennstoffe sicherzustellen. Dazu wurden im Rahmen von vier Betriebsversuchen und zahlreichen Laborversuchen die Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens hinsichtlich seiner möglichen  $\text{NO}_x$ -Minderungswirkung ausgelotet. In diesem Zusammenhang wurde auch untersucht, ob ein Ammoniak-schlupf auftritt und inwieweit dieser zu einer Erhöhung der Ammoniak-Emissionen oder zur Anreicherung von Ammoniumverbindungen im äußeren Kreislauf führen kann.

Die Ergebnisse der Betriebs- und Laborversuche zeigen, dass durch die Kombination der gestuften Feuerung mit dem SNCR-Verfahren  $\text{NO}_x$ -Emissionswerte von weniger als  $500 \text{ mg/m}^3$  an Vorcalcinieranlagen erreicht werden können. Das SNCR-Verfahren kann dabei in einem sehr weiten  $\text{O}_2$ - bzw.  $\text{CO}$ -Konzentrationsbereich angewendet werden. Das Reduktionsmittel kann grundsätzlich sowohl in der Reduktions- als auch in der Ausbrandzone zugegeben werden. Von sehr maßgeblicher Bedeutung für die Wirksamkeit des SNCR-Verfahrens bei Anwendung im Calcinator ist eine schnelle und gleichmäßige Eindüsung des Reduktionsmittels in den  $\text{NO}$ -beladenen Abgasstrom.

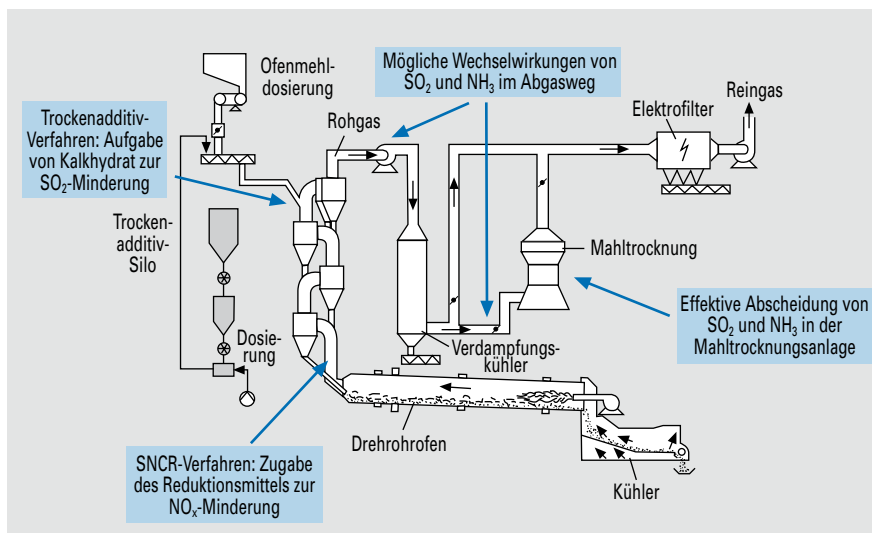
Bei allen Versuchen nahm die  $\text{NO}_x$ -Minderung mit steigendem  $\text{NH}_3/\text{NO}$ -Molverhältnis zu, wobei zum Teil sehr hohe

Reduktionsraten (kurzzeitig bis zu 90 % Minderung) erreicht werden konnten. Allerdings nehmen auch die Wechselwirkungen zwischen den Verfahren und damit die Auswirkungen auf den  $\text{CO}$ -Ausbrand zu. So konnte bei den durchgeführten Betriebsversuchen nachgewiesen werden, dass der  $\text{CO}$ -Ausbrand durch die SNCR-Reaktion verzögert wird. Eine merkbare Verzögerung trat besonders dann auf, wenn das Reduktionsmittel in der reduzierenden Zone bei niedrigen Luftzahlen aufgegeben wurde. Diese Verzögerung der  $\text{CO}$ -Oxidation kann sich auf die  $\text{CO}$ -Emission auswirken, wenn die Verweildauer im Calcinator für einen vollständigen  $\text{CO}$ -Ausbrand nicht ausreichend ist. Erfahrungsgemäß ist für einen vollständigen Ausbrand eine Verweildauer von ca. einer Sekunde im Calcinator notwendig. Die optimale Zugabestelle für das Reduktionsmittel muss jedoch individuell erprobt werden, da die Effektivität des SNCR-Verfahrens von vielen Faktoren bestimmt wird (Temperatur, Brennstoffeigenschaften, Verweildauer,  $\text{O}_2$ -,  $\text{NO}$ - und  $\text{CO}$ -Konzentration, Einmischung des Reduktionsmittels sowie Ort der Mehlzuführung). Unter gewissen Umständen kann – in Hinblick auf die  $\text{NO}_x$ -Minderung und eine gleichzeitige Optimierung des  $\text{CO}$ -Ausbrands – das SNCR-Verfahren alleine effektiver sein als die Kombination mit der gestuften Verbrennung.

Mit zunehmendem  $\text{NH}_3/\text{NO}$ -Molverhältnis nimmt auch der Ammoniak-schlupf teilweise deutlich zu. Insbesondere in den Direktbetriebsphasen können bei hohen Molverhältnissen signifikante  $\text{NH}_3$ -Emissionen auftreten (bis zu  $200 \text{ mg/m}^3$ ). In den Verbundbetriebszeiten wurde hingegen – auch bei hohen  $\text{NH}_3/\text{NO}$ -Molverhältnissen – kein nennenswertes Ansteigen der  $\text{NH}_3$ -Emissionen beobachtet. In der Rohmühle kommt es folglich zu einer sehr effektiven Einbindung des Ammoniaks. Dadurch bedingt kann es allerdings zu einer Anreicherung von Ammonium-Verbindungen im äußeren Kreislauf kommen. Die Ammonium-Gehalte in den Filterstäuben und den Mehlen können – wie im vorliegenden Fall – mit zunehmendem Reduktionsmitteleinsatz bzw. fallender  $\text{NO}_x$ -Emission steigen (**Bild II-21**). Inwiefern diese Effekte durch die Optimierung der Eindüsung des Reduktionsmittels bzw. der Betriebsführung vermieden bzw. gemindert werden können, soll Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.



**Bild II-21: Ammoniumgehalte im Rohmehl und Ofenmehl bei unterschiedlichen  $\text{NO}_x$ -Zielwerten an einer Vorcalcineranlage**



**Bild II-22: SNCR-Verfahren zur  $\text{NO}_x$ -Minderung und Trockenadditiv-Verfahren zur  $\text{SO}_2$ -Minderung**

### Betriebsversuche bei Anwendung des SNCR- und Trockenadditiv-Verfahrens

Beim Betrieb von Drehofenanlagen der Zementindustrie sind die durch die TA Luft und die 17. BImSchV vorgegebenen Emissions(grenz)werte einzuhalten. Oftmals ist dies nur durch die Anwendung von Emissionsminderungsmaßnahmen möglich. Entsprechend den Regelungen der europäischen IVU-Richtlinie (Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) sind dazu beste verfügbare Techniken (englisch: BAT) einzusetzen. Für die  $\text{NO}_x$ -Minderung gilt u. a. das SNCR-Verfahren als BAT für die  $\text{SO}_2$ -Minderung das Trockenadditiv-Verfahren. Beide Emissionsminderungs-Verfahren

finden in der deutschen Zementindustrie breite Anwendung.

In einem von der AiF geförderten Forschungsprojekt Nr. 13552 N wurde in diesem Zusammenhang untersucht, ob beide Minderungsverfahren ein ausreichendes Potenzial zur Einhaltung der Grenzwerte aufweisen und ob eine gegenseitige Beeinflussung der Verfahren (Einfluss auf die Stoffkreisläufe, Emissionssituation) gegeben ist (Bild II-22). Dazu wurden Betriebsversuche an vier Ofenanlagen durchgeführt, an denen sowohl das SNCR-Verfahren als auch das Trockenadditiv-Verfahren angewendet wird. An den einzelnen Anlagen wurden unterschiedliche Reduktionsmittel eingesetzt, z. B.

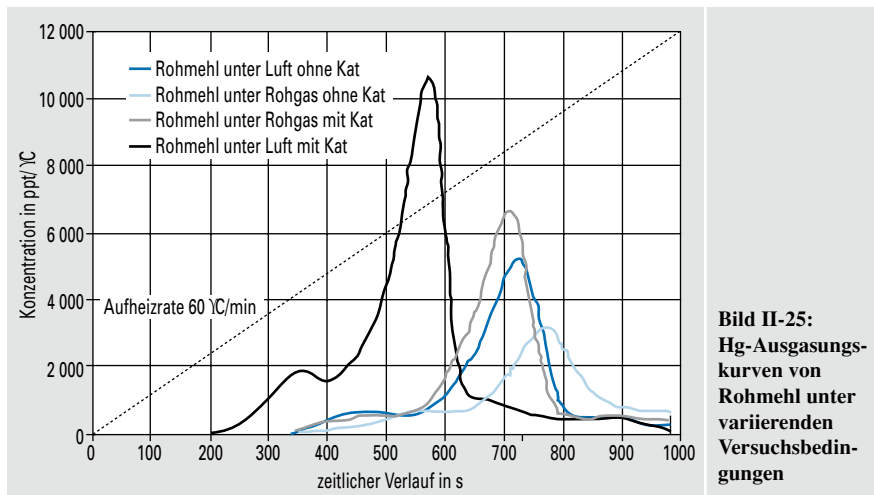
Ammoniakwasser oder Photowasser. Als Adsorbens zur  $\text{SO}_2$ -Minderung wurde Kalkhydrat verwendet.

Das  $\text{NO}_x$ -Ausgangsniveau (ohne SNCR-Verfahren) lag in allen Fällen unter  $1000 \text{ mg/m}^3$ . Zumindest bei Kurzzeitversuchen mit steigender Aufgabe des Reduktionsmittels konnte unter diesen Bedingungen zwar ein  $\text{NO}_x$ -Zielwert von  $200 \text{ mg/m}^3$  erreicht werden. Jedoch waren dazu sehr hohe  $\text{NH}_3/\text{NO}$ -Molverhältnisse von  $\geq 2$  erforderlich, d. h. deutlich überstöchiometrische Eindüseraten. Unter diesen Bedingungen kann es zu Emissionen von nicht-umgesetztem Ammoniak, dem sogenannten  $\text{NH}_3$ -Schlupf, kommen.

Die bei den Versuchen gemessenen  $\text{NH}_3$ -Emissionen zeigten eine große Spannbreite, sowohl im „Normalbetrieb“ als auch bei abgesenktem  $\text{NO}_x$ -Zielwert. Insbesondere im Direktbetrieb wurden z. T. hohe  $\text{NH}_3$ -Emissionskonzentrationen festgestellt. In Bild II-23 sind die bei einem Langzeitversuch gemessenen  $\text{NH}_3$ -Emissionen bei einem  $\text{NO}_x$ -Zielwert von  $200 \text{ mg/m}^3$  dargestellt. Während im Verbundbetrieb (VB) mit zwei Rohmühlen nur vernachlässigbare  $\text{NH}_3$ -Konzentrationen im Reingas auftraten, war im Verbundbetrieb mit einer Rohmühle ein Anstieg auf 70 bis  $80 \text{ mg/m}^3$  und im Direktbetrieb (DB) auf 150 bis  $> 200 \text{ mg/m}^3$  zu verzeichnen. Dagegen wurden bei einer anderen Ofenanlage mit einem niedrigen  $\text{NO}_x$ -Ausgangsniveau auch bei einem  $\text{NO}_x$ -Zielwert von  $200 \text{ mg/m}^3$  sehr niedrige  $\text{NH}_3$ -Emissionen ( $\leq 30 \text{ mg/m}^3$ ) festgestellt – sowohl im Verbundbetrieb als auch im Direktbetrieb.

Weiterhin wurde untersucht, ob hohe  $\text{NH}_3$ -Konzentrationen im Abgas möglicherweise eine verstärkte  $\text{SO}_2$ -Minderung begünstigen. Bei Langzeitversuchen mit niedrigem  $\text{NO}_x$ -Zielwert und entsprechend hoher Ammoniakzugabe wurde eine gewisse Verminderung der  $\text{SO}_2$ -Emissionen festgestellt. Bei den Kurzzeitversuchen (über wenige Stunden) zeigte sich ein solcher Effekt allerdings nur an einer Ofenanlage mit Gewebefilter. Eine  $\text{SO}_2$ -Minderung (in Form von Ammoniumsulfat) durch überschüssiges  $\text{NH}_3$  konnte dabei nicht eindeutig nachgewiesen werden.





**Bild II-25:**  
Hg-Ausgasungs-  
kurven von  
Rohmehl unter  
variierenden  
Versuchsbedin-  
gungen

Der Laborofen, der speziell im Hinblick auf die Reaktionsbedingungen im Vorwärmer von Drehofenanlagen der Zementindustrie entwickelt wurde, ermöglicht die gezielte Behandlung von Feststoffproben mit beliebig zusammengesetzten Gasen im Temperaturbereich zwischen 20 und 1000 °C.

Über einen Gasmischer wird zunächst eine Gasatmosphäre bestimmter Zusammensetzung (Bestandteile: N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> und gegebenenfalls CO) synthetisch hergestellt. Damit ist es möglich, die Zusammensetzung eines Drehofenabgases zu simulieren. Das auf diese Weise erzeugte Gasgemisch wird in den Laborofen geleitet. In diesem wurde zuvor eine genau abgewogene Menge (ca. 1 g Rohmehl bzw. 0,2 g Filterstaub) der zu untersuchenden Feststoffprobe eingebracht. Durch Messung der Gaszusammensetzung des austretenden Gases lassen sich Rückschlüsse auf die Reaktionen zwischen Feststoff und Gasphase ziehen.

Zur Messung der Quecksilber-Konzentration im Abgasstrom wird ein kontinuierlich messender Quecksilberanalysator verwendet. Das heiße Messgas wird dazu über einen beheizten Messgasschlauch direkt in das Hg-Messgerät geleitet. Zur Unterscheidung, ob das Quecksilber in gebundener Form oder aber elementar in den Proben vorliegt, werden die Untersuchungen mit und ohne Katalysator durchgeführt. Wird der in den Quecksilberanalysator integrierte Katalysator umgangen, detektiert das Gerät nur das elementare Hg im Abgas, während im Betrieb mit Katalysator auch die Quecksilberverbindungen erfasst werden. Temperatur und Konzentration werden über eine Messdatenerfassung aufgezeichnet und einem Messwertrechner zur Auswertung zur Verfügung gestellt. Die Abgaszusammensetzung (CO, CO<sub>2</sub>, NO, O<sub>2</sub>) wird kontinuierlich durch in Reihe geschaltete Gasanalysatoren gemessen. Zum

einen wird die Ausgasung unter Luft und zum anderen unter Rohgasbedingungen durchgeführt. Die Proben werden dabei mit konstanter Rate von der Umgebungstemperatur auf 1000 °C aufgeheizt. Der Quecksilbergehalt der untersuchten Proben wurde zuvor analytisch im Labor bestimmt.

Aus den ersten Versuchen wird deutlich, dass ein Großteil des im Rohmehl enthaltenen Hg (ca. 1 ppm) im betrachteten Temperaturbereich – unabhängig von den Versuchsbedingungen – freigesetzt wird. Erwartungsgemäß liegen die Hg-Gehalte in den getemperten Proben nach Versuchsende weitgehend unterhalb der Nachweisgrenze von 0,02 mg/kg. Wurde der Katalysator umgangen, so zeigte das Messgerät niedrigere Hg-Konzentrationen an als bei den Versuchen, in denen das Gas über den Katalysator geleitet wurde. Dies ist darauf zurückzuführen, dass erwartungsgemäß bei Einsatz des Katalysators auch die Hg-Verbindungen (z. B. HgCl<sub>2</sub>) messtechnisch erfasst werden können.

Als Beispiel für die Ausgasungskurven sind in **Bild II-25** Ausgasungskurven von Rohmehl unter Rohgasbedingungen (3 Vol.-% Sauerstoff) und unter atmosphärischen Bedingungen bei Einsatz des Katalysators (Quecksilber gesamt) sowie Umgehung des Katalysators (nur elementares Quecksilber) dargestellt.

Aus den Ausgasungskurven des Rohmehls unter atmosphärischen Bedingungen (schwarze und blaue Linie) wird ersichtlich, dass das Quecksilber, welches im Rohmehl enthalten ist, zu unterschiedlichen Zeiten bzw. Temperaturen freigesetzt wird. Dies deutet darauf hin, dass es in verschiedenen Bindungsformen bzw. unterschiedlich adsorbiert an der Oberfläche der Feststoffe vorliegt. Oberhalb von ca. 200 °C wird zunächst ein geringer Teil

des im Rohmehl enthaltenen Quecksilbers freigesetzt. Daran anschließend wird der weitaus größte Anteil des Quecksilbers und anschließend eine weitere kleinere Menge frei. Oberhalb dessen beobachtet man eine weitere Freisetzung, die jedoch auf Rückhalteeffekte in der Versuchsanlage zurückzuführen sein könnte. Aus dem Vergleich der beiden Kurven (mit Katalysator/schwarze Linie sowie ohne Katalysator/blau Linie) wird deutlich, dass die erste Freisetzung bei ca. 200 °C auf eine Freisetzung von elementarem oder adsorbiertem Quecksilber zurückzuführen sein muss. Die anschließend deutliche Freisetzung ist nach derzeitigem Kenntnisstand auf eine Freisetzung von beispielsweise Hg(II)O oder einer Mischung leichtflüchtiger Hg-Verbindungen zurückzuführen. Ohne den Einsatz des Katalysators (blaue Linie) wird zu diesem Zeitpunkt vergleichsweise wenig Hg detektiert. Dies deutet darauf hin, dass es sich bei dem freigesetzten Hg nicht allein um elementares Hg, sondern um eine Hg-Bindungsform (möglicherweise Hg<sup>+</sup>- oder Hg<sup>2+</sup>-Verbindungen) handelt, die beim Überleiten über den Katalysator reduziert wird. Beim Durchgang durch den Katalysator wurde dieser Quecksilberanteil des Rohmehls allerdings nicht vollständig erfasst. Am Katalysator wird möglicherweise nur zweiwertiges Quecksilber quantitativ in elementares und damit messbares Quecksilber überführt. Einwertiges Quecksilber wird dagegen möglicherweise nur in geringem Maße in die elementare und damit messbare Form umgesetzt. Das bedeutet, dass diese Hg-Verbindungen durch den Katalysator nicht vollständig in elementares Quecksilber umgewandelt werden.

Aus der Grafik wird weiterhin deutlich, dass die Reaktionsbedingungen, sprich die Gaszusammensetzung, einen Einfluss auf den Zeitpunkt der Freisetzung haben. Unter Rohgasbedingungen wird der Zeitpunkt der Freisetzung zu höheren Temperaturen verschoben. Offenbar wird die Umsetzung der vorliegenden Hg-Verbindungen zu elementarem – und damit von dem Photometer des kontinuierlich arbeitenden Analysators messbarem – Quecksilber unter Rohgasbedingungen verlangsamt. Dies geht insofern mit den vorgenannten Vermutungen einher, dass unter oxidierenden Bedingungen die zweiwertigen Hg-Verbindungen gegenüber den einwertigen Verbindungen bevorzugt auftreten. Dementsprechend werden unter oxidierenden Bedingungen (unter Luft) höhere Mengen an Quecksilber detektiert als unter Rohgasbedingungen, da die zweiwertige Bindungsform einfacher in die elementare Form umwandelbar ist.



Bild II-26: Situation vor Errichtung des Schallschirms



Bild II-27: Situation nach Errichtung des Schallschirms

Zur genaueren Klärung der genannten Phänomene sind weiter gehende Untersuchungen im Rahmen des AiF-Forschungsvorhabens Nr. 14547 geplant.

## Schallschutz ■

Zur Fortschreibung der Lärminderungsmaßnahmen in einem süddeutschen Zementwerk wurde die Umweltmessstelle beauftragt, eine Lärmprognose zur Projektierung eines Schallschirms für den Planetenkühler des Drehofens zu erstellen. Aufgrund seiner Lage in einer Talsohle strahlte der Drehofen ungehindert zu der angrenzenden höher gelegenen Wohnbebauung. Grundlage für die schalltechnische Beratung war eine so genannte Werkslärmkarte.

Der Planetenkühler bestimmte als Hauptlärmquelle im Wesentlichen den Immissionspegel in der Umgebung des Werks. Um die Schallabstrahlung des Planetenkühlers auf ein nicht immissionsrelevantes Maß zu senken, entschied sich die Werksleitung, den Bau eines Schallschirms in Auftrag zu geben.

### Schallschirm für Planetenkühler

Die hohen Schallemissionen von Planetenkühlern entstehen durch den Aufprall des Klinkers auf die Blechwände in dem nicht ausgemauerten Teil der Kühlrohre. Die Geräuschentwicklung hängt vor allem von der Korngrößenverteilung des Klinkers und der Bauart der Hubschaufeln in den Kühlrohren ab. Das Geräusch tritt beim Drehen des Ofens gleichzeitig in allen Rohren auf, sodass sich ein hoher Schalleistungspegel einstellt. Bei ungehinderter Schallabstrahlung sind daher Planetenkühler unter Um-

ständen auch in größeren Entfernungen zu hören.

Das Materialfallgeräusch am Auslauf des Kühlers und die Lärmemission des Brechers sind für die Gesamtemission des Kühlers von untergeordneter Bedeutung. Eventuell trägt das Plattenförderband für den Transport des heißen Klinkers durch Quietschgeräusche zur Auffälligkeit in der Schallemission bei. Quietschgeräusche können entstehen, da aufgrund der hohen Temperatur des Klinkers das Plattenband nicht geschmiert werden kann.

Die Geräuschemission wurde im Nahbereich des Klinkerkühlers messtechnisch erfasst. Der Schalldruckpegel lag, gemessen in 4 bis 5 m horizontalem Abstand von den Kühlrohren im Mittel bei 95 dB(A). Das Maximum des Schalldrucks befand sich im Frequenzbereich zwischen 1000 Hz und 2000 Hz.

Eine lärm-dämmende Kapselung der einzelnen Kühlrohre war wegen der hohen Manteltemperaturen und der erforderlichen Wärmeabfuhr durch Strahlung und Konvektion nicht möglich. Wenn der Planetenkühler, wie im vorliegenden Fall, nur nach einer Seite zur Nachbarschaft hin abgeschirmt werden muss, kann ein Schallschirm genügen. Der Schirm muss jedoch nah am Kühler positioniert werden und wesentlich höher und länger sein als der Kühler.

Die zu erwartende Pegelminderung durch einen Schallschirm lässt sich mittels Schallausbreitungsrechnung berechnen. Die Lärmemission des Planetenkühlers sollte durch die Schirmwirkung des Schallschirms um mindestens 8 dB(A) reduziert werden. Sie ist insbesondere von dem

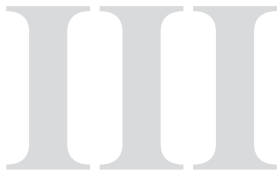
Verhältnis der wirksamen Schirmhöhe, der Wellenlänge des Schalls und dem so genannten Schattenwinkel abhängig. Da die Wellenlänge mit wachsender Frequenz abnimmt, ist die Abschirmung bei hohen Frequenzen besser als bei niedrigen. Im Fall des Planetenkühlers wurde als ungünstigste Abschätzung mit einer Hauptfrequenz von 1000 Hz gerechnet. Das entspricht einer Wellenlänge des Schalls von etwa 0,34 m.

Die Schirmwirkung des Schallschirms wurde durch eine schall absorbierende Auskleidung auf der zur Emissionsseite liegenden Wandfläche verbessert. Befinden sich im Nahbereich des Kühlers schall reflektierende Wände, so wird die Abschirmwirkung im Prinzip verschlechtert. Aus diesem Grund wurden die Betonwände der Klinkersilos bei den Berechnungen der Lärmimmission berücksichtigt.

Im vorliegenden Fall überragt die Schirmwand den Kühler um 7,5 m und hat einen seitlichen Überhang von 19 m. Im unteren Teil der Wand wurden zur Verbesserung der Luftzirkulation und damit verbundener Wärmeabfuhr große Zuluftöffnungen vorgesehen. Diese Öffnungen sind mit Kulissenschalldämpfern bestückt.

Vom subjektiven Höreindruck hat der Schallschirm die Erwartungen erfüllt. Geplant ist, durch weitere Lärmimmissionsmessungen in der Umgebung des Werks die Abschirmwirkung des Schallschirms von 8 dB(A) messtechnisch zu überprüfen.

Die **Bilder II-26** und **II-27** zeigen die Situation vor und nach Errichtung des Schallschirms.



## Leistungsfähigkeit von Zement

Die ökonomische und ökologische Bedeutung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen ist in den letzten Jahren stark gestiegen und wird auch zukünftig weiter zunehmen. Im Forschungsinstitut wurden deshalb die intensiven Arbeiten zum Einfluss der chemischen Reaktivität von Hüttensanden auf die Festigkeitsentwicklung von Zementen fortgesetzt. Entgegen der früheren Auffassung können hohe Festigkeiten mit chemisch weniger reaktiven Hüttensanden erreicht werden. Ursache hierfür ist, dass bei reaktiven Hüttensanden die im frühen Stadium der Hydratation gebildeten gelartigen Reaktionsprodukte die Festigkeiten verringern. Auf Basis dieser Erkenntnisse ergeben sich neue Ansätze zur Optimierung von Hochofenzementeigenschaften.

Die wachsenden Marktanteile von CEM II- und CEM III-Zementen haben zu einem erhöhten Bedarf an zuverlässigen und anwenderfreundlichen Methoden zur Bestimmung der Zementzusammensetzung geführt. Daher wurden im Forschungsinstitut die Einsatzmöglichkeiten röntgendiffraktometrischer Verfahren zur Quantifizierung des Hüttensandgehalts von Zementen untersucht. Die Ergebnisse belegen, dass die Röntgenpulverdiffraktometrie eine leistungsfähige und hinreichend zuverlässige Alternative zu den bisherigen Analysemethoden darstellt.

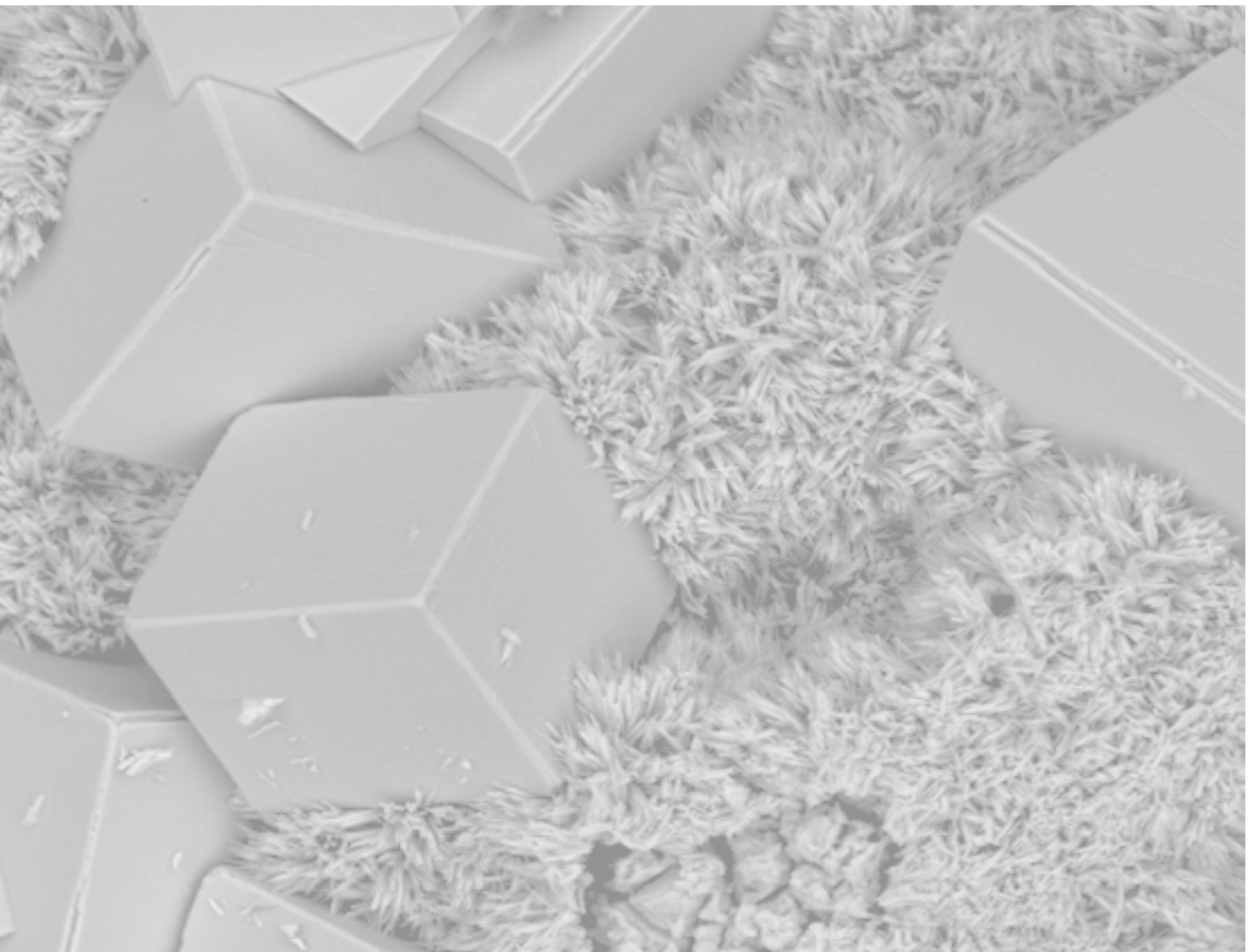
Die Leistungsfähigkeit von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen hängt nicht nur von der Reaktivität, sondern auch von der Korngrößenverteilung der verschiedenen Komponenten ab. Im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte wurden entsprechende Untersuchungen z. B. mit hüttensand- oder flugaschehaltigen Zementen durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass die Festigkeitsentwicklung der Zemente allein durch Variation der Korngrößenverteilungen ihrer Hauptbestandteile optimiert werden kann.

Die bei der Klinkerproduktion anfallenden Prozessstäube werden bislang überwiegend im Rahmen einer anlagenintegrierten Kreislaufführung verwertet. In Untersuchungen des Forschungsinstituts wurde nachgewiesen, dass Bypassstaub Primärrohstoffe bei der Herstellung von Glas und von Mineralschaumprodukten substituieren kann. Diese neuartige Verwertungsmöglichkeit ist aus wirtschaftlicher Sicht sowohl für die Zementindustrie als auch für die Glasindustrie interessant.

Zur systematischen Untersuchung der Hydratation von Zementen werden häufig Klinker mit definierter Phasenzusammensetzung benötigt. Die Herstellung solcher Klinker ist jedoch schwierig, einfacher ist die Mischung separat erzeugter einzelner Klinkerphasen. Aus diesem Grund wurden Untersuchungen zur Vergleichbarkeit der Hydratation technischer sowie im Labormaßstab hergestellter Zemente durchgeführt. Es zeigte sich, dass der Hydratationsverlauf von Zementen, die aus separaten Klinkerphasen hergestellt wurden, sehr gut dem Hydratationsverlauf technischer Zemente gleicher Zusammensetzung entspricht.

Seit mehreren Jahren werden im Forschungsinstitut neben den Sulfatwiderstandsprüfungen mit Schnellprüfverfahren auch Prüfungen unter praxisnahen Bedingungen durchgeführt. Hierbei werden die Sulfatkonzentration des angreifenden Mediums und der Wasserzementwert begrenzt. Außerdem finden die Prüfungen bei einer niedrigen Umgebungstemperatur statt. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Ergebnisse dieser Prüfungen die baupraktischen Erfahrungen besser widerspiegeln als die zurzeit in Deutschland gebräuchlichen Schnellprüfverfahren.





## Chemisch-mineralogische Zusammensetzung ■

Die von den VDZ-Mitgliedswerken hergestellten Zemente werden in regelmäßigen Abständen röntgenfluoreszenzanalytisch auf ihre chemische Zusammensetzung untersucht. In **Tafel III-1** sind die Mittelwerte

sowie die Höchst- und Niedrigstwerte der Portlandzemente der unterschiedlichen Festigkeitsklassen nach DIN EN 197 zusammengestellt. Erstmals kann auf eine Darstellung von CEM I 32,5 üblicher Anfangsfestigkeit (N-Zemente) verzichtet werden, da diese Sorte nur noch an wenigen Standorten mit den besonderen Eigenschaften „LH/SR“ (niedrige Hydra-

tationswärme, hoher Sulfatwiderstand) produziert wird.

Die Verlagerung der Marktanteile hin zu Portlandkompositzementen hat sich weiter fortgesetzt. Neben den herkömmlichen Zementtypen werden verstärkt so genannte M-Zemente (mit mehreren Hauptbestandteilen) hergestellt, wobei der Schwerpunkt

**Tafel III-1: Chemische Zusammensetzung von Portlandzementen unterschiedlicher Festigkeitsklassen; Angaben in M.-%, glühverlusthaltig**

CEM I															
Festigkeitsklasse	32,5 R			42,5 N			42,5 R			52,5 N			52,5 R		
	Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max.
SiO <sub>2</sub>	18,49	20,09	22,54	18,52	20,75	23,55	18,53	20,05	23,34	19,13	20,19	22,27	18,65	20,20	22,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,78	5,00	6,12	3,74	4,56	5,63	3,79	4,93	5,85	3,96	4,84	5,47	3,52	4,79	6,11
TiO <sub>2</sub>	0,20	0,26	0,33	0,19	0,24	0,29	0,21	0,25	0,30	0,21	0,25	0,31	0,20	0,25	0,30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,32	2,67	4,44	1,31	2,33	4,39	1,29	2,62	4,27	1,36	2,49	3,47	1,16	2,36	4,29
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,08	0,60	0,04	0,09	0,50	0,04	0,08	0,61	0,04	0,06	0,10	0,03	0,07	0,48
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,04	0,22	0,55	0,08	0,19	0,54	0,03	0,21	0,56	0,08	0,23	0,56	0,05	0,20	0,43
CaO	60,62	63,00	65,75	63,08	64,14	65,77	60,46	62,97	65,68	61,70	63,57	65,25	60,98	63,86	66,92
MgO	0,73	1,63	3,66	0,61	1,05	1,69	0,61	1,61	3,44	0,78	1,43	2,78	0,65	1,40	3,16
SO <sub>3</sub>	2,23	2,94	3,29	2,57	2,80	3,26	2,64	3,23	3,93	2,76	3,20	3,69	2,33	3,33	3,84
K <sub>2</sub> O	0,41	0,93	1,57	0,41	0,75	1,00	0,39	0,93	1,59	0,45	0,83	1,61	0,37	0,84	1,54
Na <sub>2</sub> O	0,09	0,22	0,54	0,11	0,19	0,29	0,10	0,22	0,47	0,09	0,20	0,27	0,09	0,21	0,44
Na <sub>2</sub> O <sub>Äqu.</sub>	0,46	0,84	1,36	0,49	0,69	0,85	0,46	0,84	1,35	0,50	0,82	1,49	0,42	0,77	1,21
Glv	1,49	2,98	4,35	1,52	2,93	4,35	0,92	2,84	4,56	1,14	2,65	4,11	0,88	2,50	4,55

**Tafel III-2: Chemische Zusammensetzung von CEM II-Zementen; Angaben in M.-%, glühverlusthaltig**

CEM II															
Zementart	CEM II/A-S			CEM II/B-S			CEM II/A-LL			CEM II/B-P			CEM II/B-M (S-LL)		
	Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max.
SiO <sub>2</sub>	20,27	21,88	25,18	20,51	23,97	25,63	16,87	18,12	21,80	27,68	29,84	32,22	18,16	20,31	23,10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,65	5,89	6,62	5,23	6,78	7,73	3,43	4,52	5,54	6,71	8,38	9,84	4,94	5,75	6,72
TiO <sub>2</sub>	0,23	0,31	0,41	0,29	0,37	0,54	0,19	0,23	0,30	0,35	0,41	0,46	0,24	0,29	0,39
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,05	2,47	3,13	1,13	2,05	3,04	1,12	2,53	4,13	3,31	3,77	4,34	1,46	2,21	3,87
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05	0,13	0,25	0,07	0,16	0,44	0,03	0,08	0,59	0,07	0,13	0,21	0,05	0,18	0,67
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,07	0,17	0,52	0,06	0,15	0,43	0,07	0,18	0,41	0,07	0,19	0,44	0,05	0,16	0,37
CaO	57,81	59,82	62,05	53,28	56,63	60,32	58,55	62,20	64,80	40,25	46,05	52,06	51,19	58,39	60,42
MgO	1,63	2,76	4,43	1,77	3,70	5,60	0,66	1,44	3,76	1,12	1,73	2,29	1,48	2,50	5,43
SO <sub>3</sub>	2,30	3,07	3,98	2,07	2,86	3,66	2,19	2,91	3,66	1,80	2,57	3,39	1,36	2,46	2,98
K <sub>2</sub> O	0,50	0,95	1,36	0,47	0,82	1,38	0,29	0,87	1,55	1,14	1,81	2,43	0,73	0,96	1,40
Na <sub>2</sub> O	0,14	0,23	0,35	0,14	0,26	0,68	0,08	0,17	0,29	0,52	0,91	1,41	0,15	0,22	0,35
Na <sub>2</sub> O <sub>Äqu.</sub>	0,58	0,86	1,23	0,58	0,80	1,35	0,31	0,74	1,22	1,27	2,10	3,01	0,68	0,86	1,16
S <sup>2-</sup>	0,07	0,20	0,31	0,16	0,33	0,44	-	0,06	0,13	-	-	-	0,14	0,27	0,41
Glv	1,11	2,21	3,45	0,77	2,07	3,25	3,65	6,73	8,84	3,29	4,23	5,55	4,90	6,42	8,92

Tafel III-3: Chemische Zusammensetzung von Hochofenzementen; Angaben in M.-%, glühverlusthaltig

Zementart	CEM III					
	CEM III/A			CEM III/B		
	Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max.
SiO <sub>2</sub>	24,86	26,92	29,17	27,28	29,59	31,19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,71	8,29	9,91	8,53	9,56	10,87
TiO <sub>2</sub>	0,31	0,52	1,04	0,35	0,68	1,22
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,93	1,61	3,19	0,63	1,13	2,06
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,07	0,22	0,74	0,10	0,24	0,38
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,01	0,12	0,30	0,02	0,08	0,18
CaO	43,07	51,61	55,92	41,92	47,72	51,33
MgO	2,97	4,81	8,54	4,22	5,80	9,31
SO <sub>3</sub>	1,20	2,70	3,97	0,83	2,24	3,82
K <sub>2</sub> O	0,47	0,74	1,13	0,38	0,63	1,08
Na <sub>2</sub> O	0,16	0,27	0,51	0,20	0,29	0,52
Na <sub>2</sub> O <sub>Äqu.</sub>	0,53	0,76	1,10	0,47	0,70	0,99
S <sup>2-</sup>	0,30	0,57	0,79	0,55	0,79	1,00
Glv	0,49	1,91	3,52	0,48	1,69	2,76

hier eindeutig auf CEM II/B-M (S-LL) liegt, also dem gleichzeitigen Einsatz von Hüttensand und Kalkstein als Zementhauptbestandteile. Die chemische Zusammensetzung der wichtigsten Portlandkompositzemente ist in **Tafel III-2** aufgeführt. An einzelnen Produktionsstandorten werden auch Ölschiefer, Flugasche oder Silicastaub als Hauptbestandteile für Portlandkompositzemente eingesetzt.

**Tafel III-3** fasst die chemische Zusammensetzung der aktuell produzierten Hochofenzemente (CEM III/A und CEM III/B) zusammen. Von untergeordneter Bedeutung sind in Deutschland zurzeit noch die Zementtypen CEM III/C, CEM IV und CEM V, die nur vereinzelt hergestellt werden. Für diese Zemente muss sich zeigen, ob z. B. über Anwendungszulassungen Einsatzgebiete eröffnet werden können, die über den heutigen Genehmigungsstand nach DIN 1045-2 hinausgehen.

### Reaktivität von Hüttensanden ■

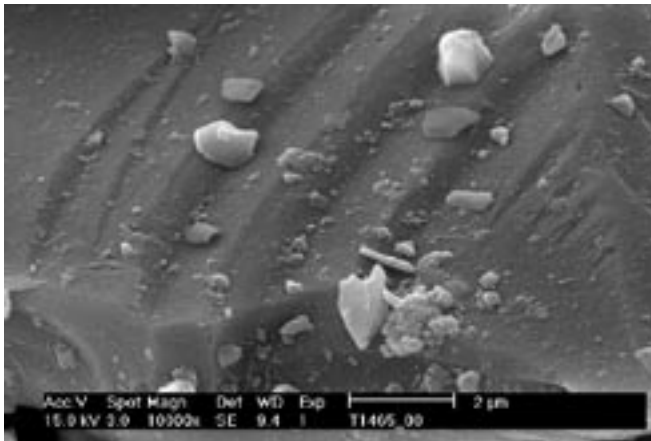
Seit vielen Jahrzehnten hat sich in der Bauwirtschaft der Einsatz von Hochofenzementen bewährt. Bei der Hydratation von Hochofenzementen wird eine geringe Hydratationswärme erzeugt, sodass sie bei der Herstellung massiger Betonbauteile vorteilhaft eingesetzt werden können. Außerdem sind Hochofenzemente häufig als sulfatbeständig eingestuft. Vor dem Hintergrund der Reduktion von Treibhausgasen ist von Bedeutung, dass Hochofenzemente bei ihrer Herstellung geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachen als Zemente mit höheren Klinkeranteilen. Allerdings sind andere Zemente nicht beliebig gegen Hochofenzemente austauschbar, da diese in vielen Fällen eine langsamere Festigkeitsentwicklung vor allem in den frühen Phasen der Hydratation aufweisen. Das wird allgemein auf eine moderate chemische Reaktivität der Hüttensande zurückgeführt.

In bisherigen Forschungsarbeiten wurde fast ausschließlich angenommen, dass zwischen der Festigkeitsentwicklung hochofenzementgebundener Baustoffe und der chemischen Reaktivität der enthaltenen Hüttensande ein quasi linearer Zusammenhang besteht. Die Mörteldruckfestigkeit entwickelt sich mit zunehmender Bildung von Calciumsilikathydraten (CSH) im Verlauf der Hydratation. Bei Hochofenzementen

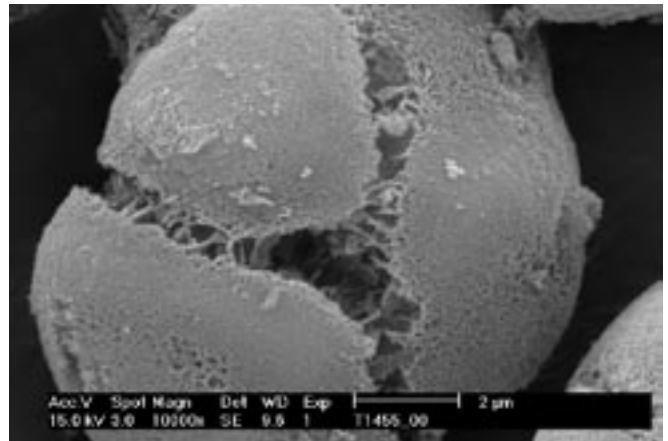
wird angenommen, dass die verwendeten Hüttensande je nach Provenienz unterschiedlich schnell zum Aufbau von CSH-Phasen und auf diese Weise zu einer unterschiedlichen Festigkeitsentwicklung beitragen. Hüttensand wird im Vergleich zu Portlandzement ganz allgemein als reaktionsträge betrachtet (latent-hydraulisch). Deshalb zielen Versuche, insbesondere die Frühfestigkeiten von Hochofenzementen zu verbessern, auf eine chemische Anregung des Hüttensands. So ist in der Praxis von „sulfatischer“ bzw. „alkalischer Anregung“ die Rede.

### Geringe Reaktivität erzeugt hohe Festigkeit

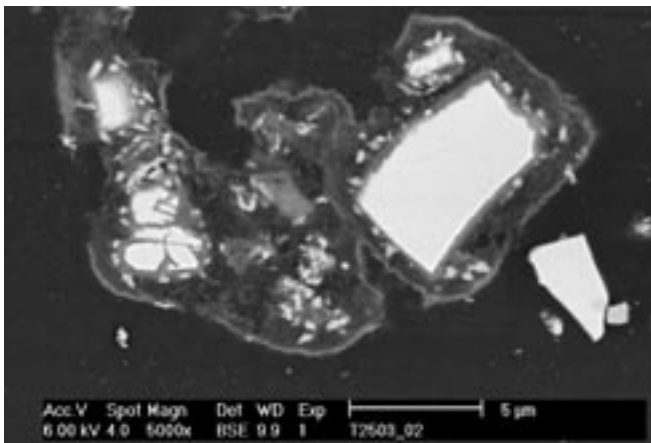
Jüngere Forschungsarbeiten des Forschungsinstituts der Zementindustrie haben gezeigt, dass die chemische Reaktivität eines Hüttensands keineswegs seinem Beitrag zur Festigkeitsentwicklung im Hochofenzementstein entspricht. Vielmehr tragen nicht die chemisch reaktiven, sondern die im wässrigen Milieu langsamer reagierenden Hüttensande zu hohen Mörteldruckfestigkeiten bei. Ein hoher Umsetzungsgrad, d. h. eine hohe Reaktivität des Hüttensands führt hingegen eher zu einer geringen Druckfestigkeit. Die Schlussfolgerung daraus ist: Die chemische Reaktion von Hüttensanden mit Wasser führt zu Reaktionsprodukten, die die Druckbelastbarkeit eines Mörtelprismas vor allem nach kurzer Hydratationsdauer verringern.



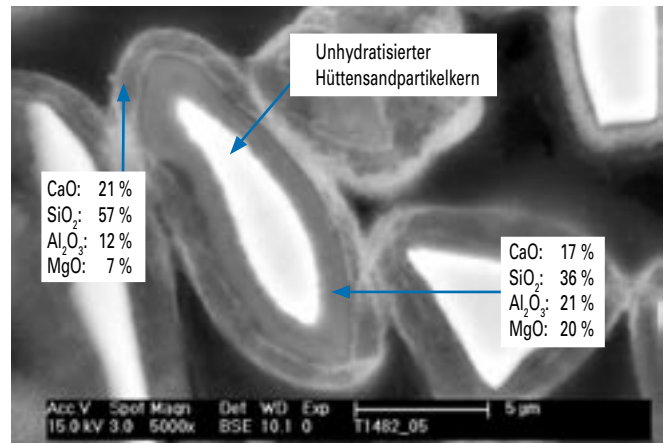
**Bild III-1:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des sieben Tage in Wasser suspendierten Hüttensands A



**Bild III-2:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des sieben Tage in Wasser suspendierten Hüttensands D



**Bild III-3:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des sieben Tage in Wasser suspendierten Hüttensands D (Anschliff)



**Bild III-4:** Ausdifferenzierte Korrosionssäume um unhydratisierten Hüttensandpartikelkern und deren chemische Hauptbestandteile (Anschliff)

Hüttensande, die im Hochofenzement eine geringe Druckfestigkeit bewirken, reagieren in wässrigem Milieu vergleichsweise schnell unter Ausbildung klar differenzierter Schichten von Hydratationsprodukten. Hinsichtlich ihres Beitrags zur Hochofenzementdruckfestigkeit reagieren leistungsstarke Hüttensande hingegen deutlich langsamer. Eine Schlüsselrolle spielt hierbei der Aluminiumanteil, der nach dominanten, frühen Reaktionen – vor allem mit Magnesium – noch verfügbar ist. Je höher dieser Aluminiumanteil ist, desto geringer ist die Hüttensandkorrosion, d. h. die von außen in das Hüttensandkorn hinein fortschreitende chemische Umsetzung der Glasmatrix. Untersuchungen des Forschungsinstituts der Zementindustrie zeigen darüber hinaus, dass auch ein enger Zusammenhang zwischen der Kinetik der Hüttensandhydratation und dem Sulfathaushalt des hydratisierenden Zements besteht. Ein Indiz dafür ist die stärker ausgeprägte Ettringitbildung bei Hochofenzementen mit aluminiumreichen, schwach reaktiven Hüttensanden.

Bei der Korrosion technischer Gläser wirkt Aluminium korrosionshemmend. Dies wird u. a. auf die Bildung von Alumosilikaten zurückgeführt, die sehr dichte, mehrdimensional vernetzte Strukturen aufweisen und eine Diffusionsbarriere darstellen.

In der Literatur werden fünf Mechanismen für die Korrosion technischer Gläser diskutiert. Die entsprechenden Modellvorstellungen lassen sich prinzipiell auch auf Hüttensandglas übertragen.

#### Aluminiumverfügbarkeit ist entscheidend

Bei der Untersuchung von fünf Hüttensanden (A bis E) mit sehr unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung zeigte sich, dass die Korrosion aluminiumreichen Hüttensandglases, analog zu aluminiumreichen technischen Gläsern, reduziert ist. Die **Bilder III-1** und **III-2** zeigen exemplarisch die Hüttensande A und D nach siebentägiger Suspension in Wasser (Massenverhältnis Hüttensand/Wasser = 1/2). Die aluminiumreichen Hüttensande A und B sind nach der

Suspensionsprozedur nur schwach korrodiert. Bei den aluminiumarmen Hüttensanden C, D und E ist die Korrosion deutlich stärker ausgeprägt. Gleichzeitig agglomerieren die einzelnen Hüttensandpartikel durch Verkleben der gebildeten gelartigen Korrosionsschichten. Stöße mit anderen Partikeln und der Gefäßwand verformen die offensichtlich plastischen Hüllen aus Reaktionsprodukten (**Bild III-3**), die bei den einzelnen Hüttensanden sehr unterschiedlich ausdifferenziert sein können (**Bild III-3** und **Bild III-4**).

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen stellte sich heraus, dass nicht der Aluminiumgesamtgehalt der Hüttensande, sondern der Aluminiumanteil maßgeblich ist, der nicht in sehr früh entstehende stabile Reaktionsprodukte eingebunden ist. Ein solches Reaktionsprodukt ist beispielsweise die so genannte hydrotalcit-ähnliche Phase, die durch Bindung von Aluminium und Magnesium in einem gemischten Hydroxid ( $Mg_4Al_2(OH)_{14} \cdot 3H_2O$ ) entsteht.

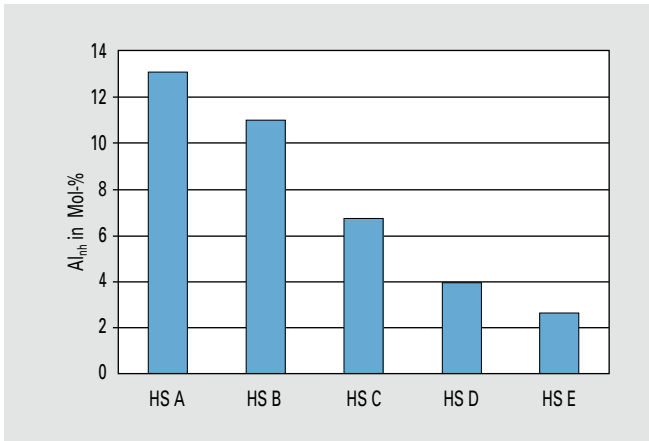


Bild III-5: Verfügbarer Aluminiumanteil der Hüttensande A bis E

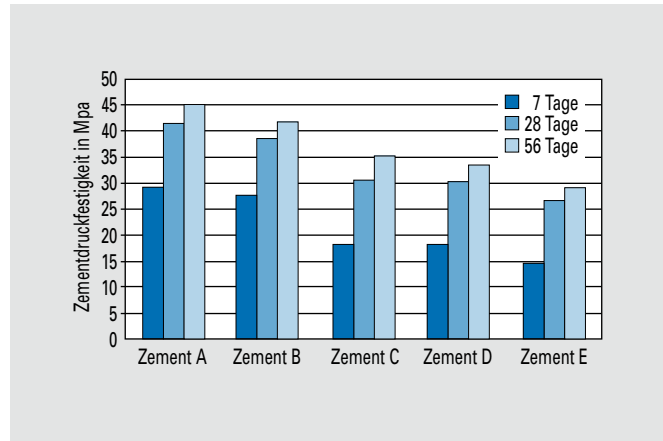


Bild III-6: Mörteldruckfestigkeiten der Hochfenzemente A bis E

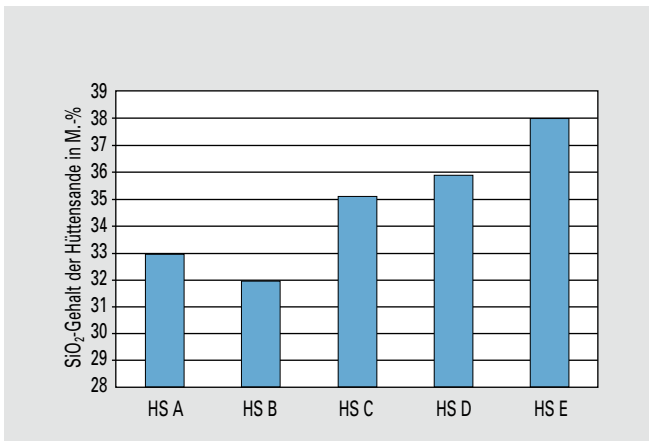


Bild III-7: Siliziumdioxidgehalt der Hüttensande A bis E

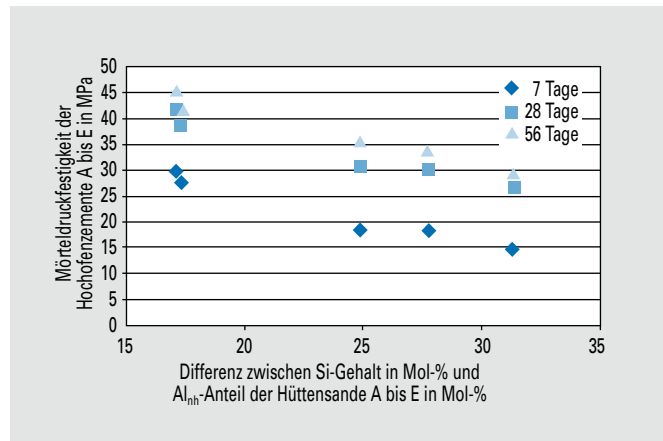


Bild III-8: Beziehung zwischen dem Siliziumüberschuss der Hüttensande A bis E und der Mörteldruckfestigkeiten der Hochfenzemente A bis E

**Bild III-5** zeigt den Anteil Aluminium der Hüttensande A bis E, der nach stöchiometrischer Berechnung nicht als hydrotalcit-ähnliche Phase gebunden sein kann ( $Al_{nh}$ ). In der Reihe der fünf Hüttensande A bis E nehmen der verfügbare Aluminiumanteil  $Al_{nh}$  und die Mörteldruckfestigkeiten (**Bild III-6**) ab. Der Siliziumgehalt hingegen nimmt tendenziell zu (**Bild III-7**). Die Untersuchungsergebnisse legen den Schluss nahe, dass der Aluminiumanteil  $Al_{nh}$  den Korrosionsfortschritt verlangsamt. Dies ist wahrscheinlich auf die Bildung von Alumosilikaten mit hoher Dichte zurückzuführen, die den Korrosionswiderstand der Hüttensandpartikel erhöhen.

### Welche Rolle spielt Silizium?

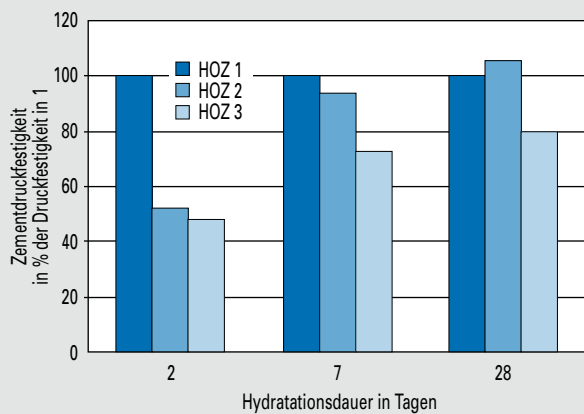
Die Hüttensande C, D und E sind im Vergleich zu den Hüttensanden A und B siliziumreich und aluminiumarm. Die Bindung von Silizium in Alumosilikaten ist bei den Hüttensanden C, D und E deshalb nur in geringerem Maße möglich. Der verbleibende, relativ hohe Siliziumanteil dieser Hüttensande kann dazu führen,

dass Siliziumoxid zumindest zeitweise als Silikathydrogel vorliegt. Vor allem die Hüttensande D und E zeigen entsprechend starke siliziumreiche Gelsäume, nachdem sie in Wasser suspendiert wurden (**Bild III-3**). Wenn nun die starken Gelsäume Ursache für eine verringerte Mörteldruckfestigkeit sind, dann muss mit sinkendem Potenzial zur Vermeidung dieser Gelsäume die Festigkeit abnehmen. Dieses Potenzial ist umso geringer, je größer der Silikatüberschuss der Hüttensande ist, der nicht durch Aluminium in Form von Alumosilikaten gebunden werden kann. Dieser Silikatüberschuss kann in erster Näherung als Differenz zwischen dem Si-Gehalt und dem für diese Reaktion verfügbaren Aluminiumanteil  $Al_{nh}$  der Hüttensande berechnet werden (**Bild III-8**). Die empirisch gewonnene Erkenntnis, dass Hüttensande nicht sauer sein dürfen, also nicht übermäßig viel  $SiO_2$  enthalten sollten, wenn sie als Zementbestandteil verwendet werden, erhält durch diese Betrachtung eine mögliche chemisch-mechanistische Erklärung.

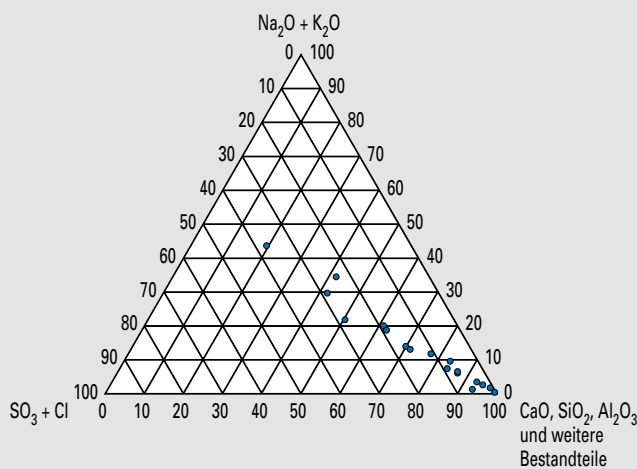
Die beschriebenen Zusammenhänge lassen den Schluss zu, dass insbesondere nach kurzen Hydratationszeiten die Bildung von silikatreichen plastischen Gelschichten Ursache für die oft geringen Mörtelrühfestigkeiten von Hochfenzementen ist.

Der zum Teil sehr unterschiedliche weitere Verlauf der Erhärtung dieser Gelschichten in belastbare Gefügestrukturalelemente geschieht in einigen Hochfenzementen schneller als in anderen, wie im nachfolgenden Beispiel mit drei Hochfenzementen verdeutlicht wird. Die Hochfenzemente 1, 2 und 3 unterscheiden sich lediglich hinsichtlich der zu 65 M.-% enthaltenen Hüttensande 1, 2 bzw. 3. sowohl Art als auch Mengenanteil von Klinker und Sulfatträger sind in allen drei Hochfenzementen identisch.

Die zunächst deutlichen Unterschiede zwischen den in **Bild III-9** dargestellten Druckfestigkeiten des Hochfenzements 1 und der Hochfenzemente 2 und 3 verringern sich im Verlauf von 28 Tagen. Die



**Bild III-9:**  
Relative Entwicklung der Mörteldruckfestigkeiten von drei Hochofenzementen (HOZ)



**Bild III-10:**  
Auswertung der Staubumfrage – Verhältnis der Gehalte an Alkalien zu Sulfat und Chlorid

Druckfestigkeiten sind relativ zu denen des Hochofenzements 1 (= 100 %) dargestellt, der nach zweitägiger Hydratation die höchste Druckfestigkeit der drei Zemente zeigt. Hochofenzement 2 erreicht zunächst nur etwa 50 % der Festigkeit des Hochofenzements 1, übertrifft diesen aber nach 28 Tagen. Hüttensand 3 zeigt das typische Verhalten eines leistungsschwächeren Hüttensands. Nach einer Hydratationsdauer von zwei Tagen erreicht die Mörteldruckfestigkeit des entsprechenden Hochofenzements 3 ebenfalls nur etwa 50 % des für Hochofenzement 1 ermittelten Werts. Dieser relative Unterschied wird auch mit zunehmender Hydratationsdauer nicht vollständig aufgehoben. Nach 28 Tagen weist Hochofenzement 3 lediglich 80 % der Druckfestigkeit von Hochofenzement 1 auf.

Nach vergleichbar „schwachem“ Start zeigen die Hochofenzemente 2 und 3 im Verlauf der weiteren Hydratation also eine unterschiedlich effiziente Verbesserung der Festigkeit. Das deutet auf eine anfänglich

ähnliche Situation im Gefüge der Mörtelprismen hinsichtlich der mechanischen Belastbarkeit hin, die sich dann aber unterschiedlich schnell ändert. Bei vergleichbarem anfänglichen Korrosionswiderstand des Hüttensandglases kann sich also die Fähigkeit der Hüttensande unterscheiden, die früh gebildeten gelartigen Reaktionsprodukte in druckbelastbare Gefügeelemente zu wandeln. Bei den beiden Hüttensanden 2 und 3 wurde nicht die schnelle Korrosion des Hüttensandglases unterbunden, sondern die Transformation der gebildeten Gelschichten erfolgt auf unterschiedliche Weise. Zur Erklärung dieses Effekts werden im Forschungsinstitut zurzeit neue Untersuchungsansätze unter Einbeziehung der Bruchmechanik verfolgt.

#### Neue Wege für Hochofenzementoptimierung sind denkbar

Auf der Basis dieser neuen Erkenntnisse des Forschungsinstituts der Zementindustrie über die Reaktivität von Hüttensanden bieten sich völlig neue Ansätze für die Optimierung der Hochofenzement-

eigenschaften. Wenn die angenommenen Beziehungen zwischen dem Aufbau plastischer Gelschichten um die korrodierenden Hüttensandpartikel und der Hochofenzementdruckfestigkeit zutreffen, ist zur Erhöhung der Frühfestigkeiten von Hochofenzementen nicht die Anregung, sondern die gezielte Dämpfung der Korrosion leistungsschwacher Hüttensande erforderlich.

Im Forschungsinstitut der Zementindustrie stellt die Prüfung dieser neuen Modellvorstellungen derzeit einen Forschungsschwerpunkt dar.

### Glasprodukte aus Prozessstäuben der Zementindustrie ■

Beim Brennen von Portlandzementklinker im Drehofen entstehen Stäube, die bei der Abgasreinigung oder in Bypassanlagen abgeschieden werden. Diese Prozessstäube werden größtenteils als Nebenbestandteil der Zemente verwendet. Hierbei muss auf Kundenanforderungen, Normkriterien und weitergehende Regelwerke, z. B. hinsichtlich des Alkaligehalts im Zement, Rücksicht genommen werden. Eine neue Möglichkeit, die stofflichen Eigenschaften dieser Prozessstäube zu nutzen, stellt die Verwendung als Rohstoffkomponente bei der Herstellung von Glas dar. Grundsätzlich steht dadurch der Ersatz eines Teils bislang handelsüblicher Glasrohstoffe durch Prozessstäube in Aussicht.

Beim Einschmelzen eines silikatischen Glasgemenges werden in der Regel Alkaliverbindungen als Flussmittel zugesetzt. Diese Funktion können alkalihaltige Stäube aus der Zementherstellung erfüllen. Die übrigen Bestandteile derartiger Stäube sind kalk- und silikatreiche Verbindungen, die ebenfalls bei der Zusammenstellung eines Glasgemenges benötigt werden. Mineralogisch können die Prozessstäube aus unreaktierten oder teilweise calcinierten Rohmehlkomponenten und Klinkerstaub, angereichert mit Freikalk, Alkalisulfaten und -halogeniden, sowie weiteren Zwischenprodukten des Klinkerbildungsprozesses bestehen. Ihre Zusammensetzung ermöglicht die Substitution eines Teils der primären Glasrohstoffe. Entscheidend für den Grad der Substitution ist in erster Linie deren chemische Zusammensetzung im Hinblick auf die Einstellbarkeit definierter Gemengezusammensetzungen und auch hinsichtlich flüchtiger bzw. gasbildender Bestandteile. Von zusätzlichem Nutzen können außerdem hydraulisch aktive

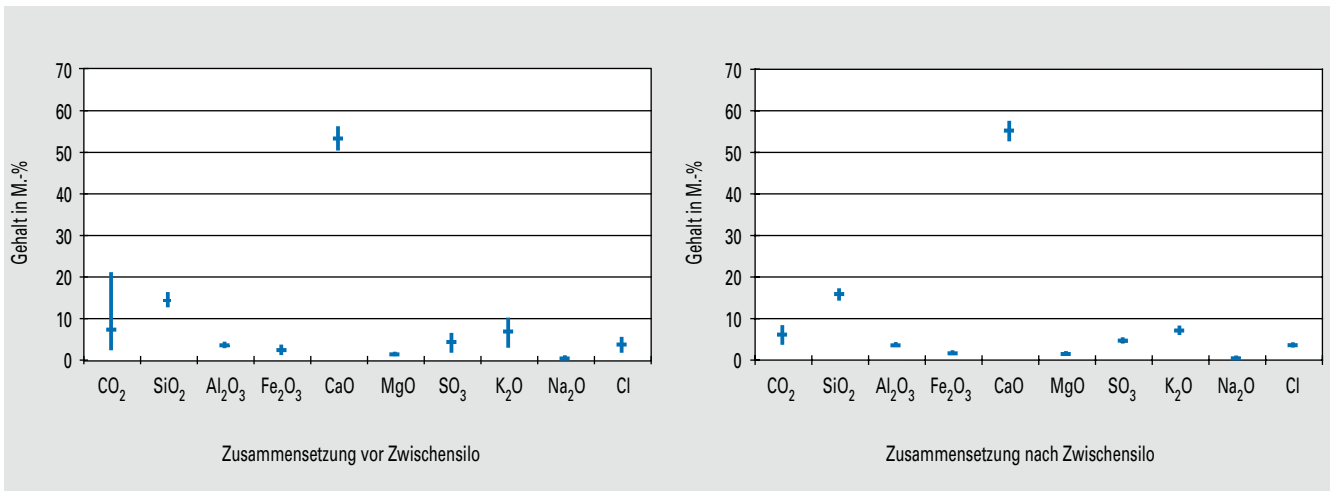


Bild III-11: Schwankungsbreite chemischer Bestandteile von Bypassstaub eines ausgewählten Zementwerks

Staubbestandteile sein, die als Bindemittel bei einer Granalienherstellung aus den Gemengerohstoffen vor dem eigentlichen Schmelzprozess wirken. Schließlich werden bei der Herstellung geschäumter bzw. geblähter Glasprodukte Trennmittel eingesetzt, die ebenfalls durch Bypass- oder auch Elektrofilterstäube substituiert werden können.

Da die Bypassstäube in ausreichend großen Mengen anfallen, scheint für die Verwendung in der Glasindustrie insbesondere der Einsatz in Massengläsern sinnvoll. Bisher vorliegende Untersuchungsergebnisse legen den Einsatz der alkalischen Nebenprodukte vor allem für die Produktbereiche Glasfaser (Gemengebestandteil, Festigkeitsbildner), Dämmstofffaser (sekundäres Bindemittel) und Mineralschaum (Gemengebestandteil) nahe. In Zusammenarbeit mit der Materialforschungs- und Prüfanstalt Weimar hat das Forschungsinstitut der Zementindustrie in einem AiF-geförderten Forschungsvorhaben nachgewiesen, dass eine solche Verwertung möglich ist.

Um die grundsätzliche Eignung zur Herstellung verschiedenartiger Glasprodukte abzuschätzen, wurde die chemische Zusammensetzung verfügbarer Stäube in den Werken zunächst im Rahmen einer Umfrage erfasst. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wurden drei Standorte für eigene Beprobungen zur Untersuchung der Gleichmäßigkeit ausgewählt. An diesen Standorten wurden außerdem größere Mengen repräsentativer Staubproben für

die anschließenden glastechnischen Versuche gewonnen.

#### Stoffliche Voraussetzungen

Aus den Umfrageergebnissen ging hervor, dass prinzipiell alle untersuchten Stäube ein Nutzungspotenzial für die Glasherstellung aufweisen. Der Substitutionsgrad, mit dem primäre Glasrohstoffe durch Produktionsstäube aus der Zementherstellung ersetzt werden können, ergibt sich im Einzelfall aus der jeweiligen chemischen Zusammensetzung. Bild III-10 zeigt eine graphische Darstellung der Umfrageergebnisse. Es sind die Gehalte an Alkalien, Sulfat und Chlorid sowie an weiteren Bestandteilen in einem Dreistoff-Diagramm dargestellt. Die Lage der Datenpunkte verdeutlicht, dass ein erhöhter Gehalt an Alkalien, die als wesentliche glastechnisch nutzbare Bestandteile betrachtet werden können, zwangsläufig auch mit einem erhöhten Gehalt an SO<sub>3</sub> bzw. Cl verbunden ist. Dabei hat sich gezeigt, dass einerseits hohe Alkaligehalte wünschenswert sind, dass aber andererseits Chloride und Sulfate als Bindungspartner der Alkalien im Staub den Substitutionsgrad begrenzen, da sie zur Blasenbildung im Glas, zur verstärkten Korrosion in der Produktionsanlage sowie zu erhöhten Emissionen führen können. Limitierend können auch erhöhte CaO-Gehalte sein, wenn sie die Viskosität der Glasschmelze beeinträchtigen.

Von grundlegender Bedeutung ist weiterhin die Gleichmäßigkeit der Zusammensetzung. Die Beprobungsversuche an mehreren Standorten haben gezeigt,

dass übermäßige Schwankungsbreiten der chemischen Zusammensetzung z. B. durch eine einfache Silo-Zwischenlagerung ausreichend verringert werden können. Die Streubreiten der Messergebnisse sind gegenüber denen der direkt vom Bypass stammenden Proben deutlich herabgesetzt, wie auch die graphische Darstellung in Bild III-11 belegt. Es ist jedoch zu erwarten, dass sich der erforderliche Grad der Homogenisierung bereits beim Transport bzw. durch das Befüllen und Entleeren eines Silofahrzeugs auch ohne vorherige Zwischenlagerung einstellt. Die Voraussetzungen für eine chargenweise Angabe der Zusammensetzung in Form eines Lieferscheins sind demnach gegeben.

#### Herstellung kompakter Gläser

Zur Vorbereitung der Glasschmelzversuche im Technikumsmaßstab wurden unter Verwendung von Bypassstäuben der drei ausgewählten Zementwerke Gemengerezepturen eingestellt, die der Zusammensetzung handelsüblicher, chemisch beständiger Gläser (C-Glas) entsprechen. Eine gute Durchmischung und Homogenisierung der Ausgangsstoffe war bereits mit geringem technischen Aufwand realisierbar. Der industriellen Praxis entsprechend wurden die Gemenge vor dem Schmelzprozess zu kugelförmigen Aggregaten granuliert, um ein Verstauben beim Einbringen in den Ofen zu vermeiden. Um den Feuchtigkeitseintrag und damit den Energieverbrauch beim Schmelzvorgang möglichst gering zu halten, erfolgte nach der Granalienherstellung zunächst eine Lufttrocknung. Die beabsichtigte Stabilität der Granalien war in-



Bild III-12: Herstellung und Verarbeitung von bypassstaubhaltigen Versuchs-Pellets

Tafel III-4: Prozesstechnische Kenngrößen der Glasschmelzversuche

	Gemenge- einsatz in kg	Umsetzungsrate in kg (%)	Anteil an Bypassstaub im Gemenge in M.-%	Energieeinsatz in kWh (kWh/kg Glas)
Werk A	≈ 126	≈ 105 (83)	9,6	670 (6,37)
Werk B	≈ 128	≈ 106 (83)	10,4	775 (7,31)
Werk C	≈ 150	≈ 126 (84)	8,4	740 (5,87)
Referenz- Glasgemenge	≈ 125	≈ 111 (89)	-	785 (7,09)

folge der vorangegangenen hydraulischen Erhärtung der Prozessstaub-Komponenten dennoch sichergestellt.

Im Anschluss konnten blasenfreie Glasprodukte und auch Zwischenprodukte in Form von Pellets bei Substitutionsraten von bis zu etwa 10 M.-% der Primärrohstoffe durch Bypassstaub erzeugt werden (Bild III-12). Die Ausführung der Kompaktglas-Schmelzen erfolgte in einem elektrisch beheizten Ofen mit einem Fassungsvermögen von ca. 80 Litern. Die eingestellten Maximaltemperaturen betragen jeweils 1410 °C. Als Referenz-Glasgemenge kam ein der industriellen Produktion entsprechendes Scherben-Rohstoff-Gemisch mit einem Scherbenanteil von ca. 35 M.-% zum Einsatz.

Die Ergebnisse der stofflichen und energetischen Bilanzierung der Schmelzyklen sind in **Tafel III-4** zusammengefasst. Während die verzeichneten Masseverluste der Bypassstaub-Gemenge-Schmelzen von bis zu 17 M.-% wesentlich auf die eingetragenen Feuchtigkeitsgehalte von bis zu 15 M.-% und in geringem Maße

auf Verdampfungsverluste zurückzuführen sind, resultiert der Schmelzverlust beim Referenz-Glasgemenge ausschließlich aus Verstaubungs- und Verdampfungsverlusten. Setzt man in den Angaben zum Energieverbrauch den spezifischen Energieeinsatz des Referenzgemenges zu 100 %, ergeben sich in Bezug dazu für die Gemenge mit Bypassstaub Energieverbräuche zwischen 83 und 103 %.

#### Blähglas und Mineralschäume

Gebälte bzw. geschäumte Glasprodukte werden vorwiegend in der Bauindustrie als Wärmedämmstoffe verwendet. Bei der Herstellung ist es erforderlich, die Rohstoffzusammensetzung möglichst nahe an eine blähfähige Glaszusammensetzung anzupassen. Das Eintragen von Glas in Versatz-Rohstoffmischungen in Form von Glasmehl stellt eine einfache Möglichkeit der Versatzkorrektur dar und hat sich technisch bewährt. Im Forschungsprojekt ist es gelungen, Versatzvarianten herzustellen, in denen das Glasmehl anteilig durch Bypassstaub ersetzt wurde. Das anschließende Sintern und die gleichzeitige Schäumung der Granulate erfolgte in einer

Drehofenanlage im Technikumsmaßstab bei Temperaturen zwischen ca. 1100 und 1150 °C. Die hydraulische Eigenschaft des Bypassstaubs begünstigte die Ausbildung der erforderlichen Kornfestigkeit der Rohgranalien.

Erwartungsgemäß begünstigten niedrige CaO-Gehalte in den Prozessstäuben die Voraussetzungen für eine thermische Erweichung und Schaumbildung. Eine Produktion von Leichtgranulaten in Blähglas-Granulatherstellung ist basierend auf den Versuchsergebnissen mit Substitutionsgraden von 50 bis 75 M.-% erreichbar.

Für die technologisch schlechter zu schäumenden Bypassstäube mit hohem CaO-Anteil wurde eine Verwertungsmöglichkeit als Trennmittel innerhalb der Blähglasgranulatherstellung aufgezeigt. Die unumgängliche Anreicherung des Trennmittels mit Bestandteilen des Rohstoffgemenges bei der Granulatproduktion erfordert einen kontinuierlichen anteiligen Austausch gegen neues Trennmittel. Die Verwendung CaO-reicher Bypassstäube ermöglichte den Einsatz des verunreinigten Trennmittels als Rohstoffkomponente, die erneut in den Prozess eingetragen werden kann. Durch diese Wiederverwertungsmöglichkeit konnte ein weiterer technologischer Nutzen erzielt werden.

Basierend auf einer vergleichbaren Rohstoffsituation bei jedoch grundsätzlich unterschiedlicher Technologie gegenüber der Herstellung von Blähglasgranulaten wurde außerdem die Eignung von Versätzen aus Glasmehl und Bypassstäuben zur Herstellung von Mineralschaumprodukten nachgewiesen (Bild III-13). Während der versuchsweisen Herstellung in der technischen



Anlage eines Mineralschaumherstellers ließen sich Substitutionsraten von 20 M.-% realisieren, ohne die Möglichkeiten zur Anpassung der Temperaturbedingungen voll auszuschöpfen. Weitere Versatz- und Verfahrensoptimierungen sind möglich.

### Faserprodukte

Die bypassstaubhaltigen Pellets aus den Kompaktglas-Schmelzversuchen wurden auf der Faserspinnmaschine eines Glasfaserherstellers eingeschmolzen und versuchsweise zu Fasern mit Elementarfadendurchmessern zwischen 8 und 12  $\mu\text{m}$  verarbeitet. Nach der Faserung wurden sie zu Faserband 400 tex versponnen. Als Vergleichskriterium diente das Verhalten handelsüblicher C-Glas-Pellets an derselben Faserbandmaschine. Sowohl die Verarbeitungstemperatur der staubhaltigen Pellets von rund 1 190 °C als auch die Anzahl der Faserabrisse beim Verdüsen kam den Vergleichswerten aus dem Versuch mit handelsüblichen Pellets nahe. Alle untersuchten Chargen waren verspinnbar. Aus allen Fasern ließen sich Spulen herstellen und anschließend zu Glasfasertextilien verweben (**Bild III-14**).

### Wirtschaftliche Betrachtungen

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens verdeutlichen das Potenzial, das Prozessstäube aus der Zementherstellung als Einsatzstoff bei der Herstellung von Glas besitzen. Diese neuartige Verwertungsmöglichkeit ist aus wirtschaftlicher Sicht sowohl für die Zementindustrie als auch für die Glasindustrie interessant. Den Zementherstellern eröffnen sich damit Alternativen zur anlagenintegrierten Kreislaufführung der Prozessstäube. Für die Glasindustrie steht eine Senkung der Produktionskosten in Aussicht, indem primäre Rohstoffkomponenten anteilig durch Stäube aus Bypass- bzw. Abgasreinigungsanlagen des Klinkerbrennprozesses ersetzt werden.

Es konnte gezeigt werden, dass alle untersuchten Stäube ein Nutzungspotenzial haben. Die erschmolzenen Gläser wurden erfolgreich zur Herstellung von Fasern weiterverarbeitet, während die geschäumten Produkte sich unmittelbar als Dämmstoffe in handelsüblicher Qualität einsetzen ließen. Der Substitutionsgrad, mit dem Glasrohstoffe durch Prozessstäube aus der Zementherstellung ersetzt werden können, ergibt sich im Einzelfall aus der jeweiligen chemischen Staubzusammensetzung.

Neben den hier aufgezeigten nutzbringenden Faktoren erscheinen die alkalischen Stäube grundsätzlich auch zum Recyceln von Abfällen künstlicher oder natürlicher



**Bild III-13:**  
Herstellung  
von Mineral-  
schaum



**Bild III-14:**  
Herstellung von  
Glasfaserspulen

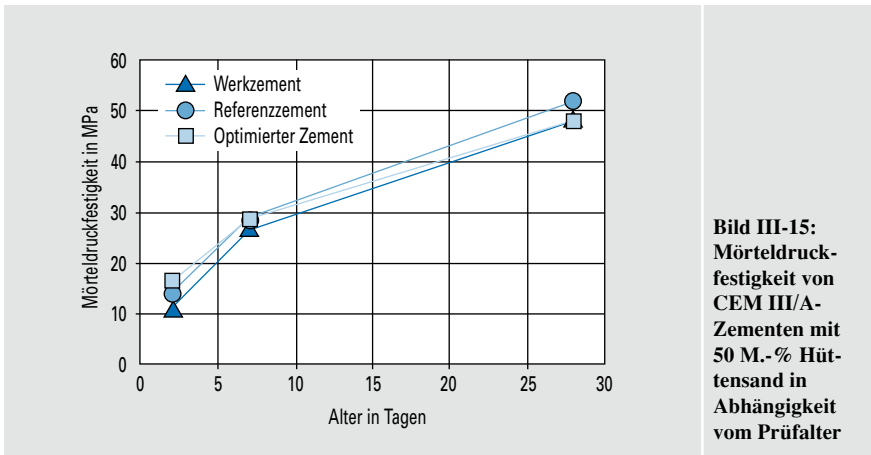
Fasern geeignet. Zum Wiedereinführen der faserigen und staubförmigen Abfälle in den Produktionsprozess können sie, unter Nutzung der hydraulischen Abbindeigenschaften, mit alkalihaltigen Stäuben gemischt, angefeuchtet und zu Formkörpern verarbeitet werden. Weiterhin können die alkalischen Prozessstäube, sofern sie reich an  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sind, neben der Funktion als Bindemittel anteilig auch die Funktion des Aluminiumträgers übernehmen und in begrenzten Anteilen den Primärrohstoff Bauxit (bis zu 17 % in Dämmstofffasern enthalten) ersetzen. Dadurch sind weitere Kosteneinsparungen möglich.

Die gewonnenen Erkenntnisse zu den Einsatzmöglichkeiten alkalischer Nebenprodukte mit hydraulischen Eigenschaften bei der Herstellung von Glasprodukten sind ein erster Schritt hin zu einer möglichen industriellen Umsetzung. Diese kann auf der Grundlage von weiterführenden, gezielten Untersuchungen in unmittelbarer Zusammenarbeit zwischen einzelnen Zementwerken und Betrieben der Glas- bzw. Dämmstoffindustrie erfolgen.

### Einfluss der Korngrößenverteilung von Zementhauptbestandteilen ■

Seit Inkrafttreten der europäischen Zementnorm DIN EN 197-1 nimmt die Bedeutung der Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen immer stärker zu. Diese Zemente bieten Möglichkeiten, durch die Verringerung des Klinkergehalts den spezifischen Energieverbrauch und damit die  $\text{CO}_2$ -Emissionen bei der Herstellung auf einem niedrigen Niveau zu halten. Des Weiteren können durch die größere Bandbreite der verfügbaren Zemente die Eigenschaften von Betonen noch besser auf bestimmte Anwendungen abgestimmt werden. Einen Schwerpunkt in der Entwicklung solcher Zemente nimmt die Optimierung der Korngrößenverteilungen der Hauptbestandteile ein.

Die europäische Zementnorm DIN EN 197-1:2004-08 beschreibt insgesamt 27 Zementarten, darunter zahlreiche Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen.



**Bild III-15:** Mörteldruckfestigkeit von CEM III/A-Zementen mit 50 M.-% Hüttenessand in Abhängigkeit vom Prüfalalter

**Tafel III-5:** Granulometrische Zusammensetzung von CEM III/A-Zementen mit 50 M.-% Hüttenessand

Zement (inkl. Sulfatträger)		Klinker		Hüttenessand		2 d / 28 d	
Feinheit in cm <sup>2</sup> /g	n	Feinheit in cm <sup>2</sup> /g	n	Feinheit in cm <sup>2</sup> /g	n		
Werkzement	4000	0,9	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	0,23
Referenzzement			3800	0,9	3800	0,9	0,27
Optimierter Zement			4300	1,0	3300	0,8	0,36

n.b.: nicht bestimmt; n: RRSB-Steigungsmaß der Korngrößenverteilung

Portlandkompositzemente können beispielsweise neben Portlandzementklinker (K) bis zu 35 M.-% kieselsäurereiche (V) oder kalkreiche Flugaschen (W), aber auch Kalkstein (LL) und Hüttenessand (S) enthalten. Allerdings liegen in Deutschland nicht für alle in der Norm genannten Zemente baupraktische Erfahrungen oder wissenschaftliche Erkenntnisse vor. Um diese Zemente in größerem Umfang als bisher einsetzen zu können, müssen die technisch-wissenschaftlichen Grundlagen erarbeitet werden. Die folgenden Beispiele aus verschiedenen Forschungsprojekten beschreiben die Optimierung der Korngrößenverteilungen von Zementhauptbestandteilen als einen wichtigen Beitrag zur Herstellung neuer, leistungsfähiger Betone. Die angegebenen Feinheiten wurden mit dem Verfahren nach Blaine ermittelt.

**CEM III/A-Zemente mit 50 M.-% Hüttenessand**

Im Forschungsinstitut der Zementindustrie werden seit vielen Jahren die Eigenschaften von Zementen mit getrennt gemahlene und anschließend gemischten Hauptbestandteilen systematisch untersucht. Vorrangig wurden hierbei Zemente mit Hüttenessandgehalten von 25, 50 und 75 M.-% betrachtet (siehe auch Tätigkeitsbericht 2003-2005). Im Berichtszeitraum

wurden weiterführende Untersuchungen an Zementen mit 50 M.-% Hüttenessand, konstanter Zementfeinheit, jedoch deutlich unterschiedlicher Korngrößenverteilung der Hauptbestandteile durchgeführt. Die Ergebnisse wurden überwiegend durch entsprechende Mörtelversuche ermittelt. **Bild III-15** zeigt die Festigkeitsentwicklung eines Werkzements und zweier Laborzemente CEM III/A der Festigkeitsklasse 32,5 R. Die drei Zemente hatten die gleiche Mahlfineinheit von etwa 4000 cm<sup>2</sup>/g. Das RRSB-Steigungsmaß der Korngrößenverteilung betrug etwa n = 0,9 (**Tafel III-5**). Die Zemente setzten sich aus jeweils 50 M.-% Klinker und Hüttenessand gleicher Herkunft, jedoch unterschiedlicher Korngrößenverteilung zusammen. Der Wasseranspruch zur Erzielung der Normsteife lag in allen Versuchen bei 28 M.-%.

Ausgangspunkt der Optimierungsversuche war der Werkzement, der mit einer 2-d-Druckfestigkeit von 11 MPa nur knapp die untere Normgrenze der Festigkeitsklasse 32,5 R überschreiten konnte und nach 28 Tagen eine Druckfestigkeit von 48 MPa erzielte. Über die Korngrößenverteilung der beiden Hauptkomponenten des Werkzements lagen keine Informationen vor. Ziel der Untersuchungen war es, die Frühfestigkeit des Zements zu erhöhen, ohne die

Festigkeitsgrenze von 52,5 MPa im Prüfalalter von 28 Tagen zu überschreiten.

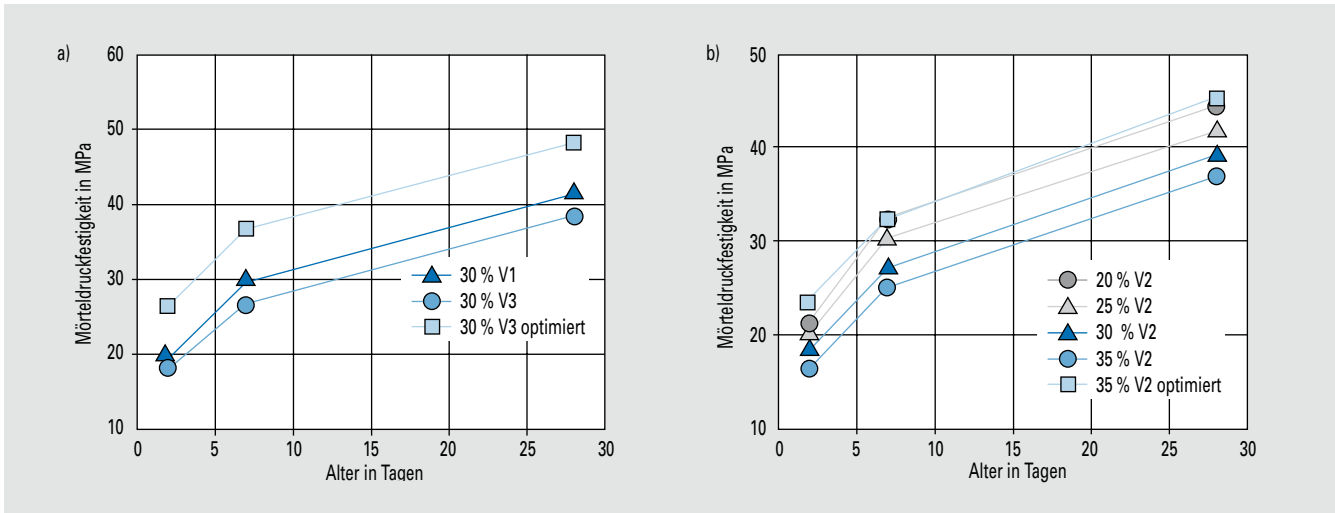
Im ersten Schritt der Optimierung wurde ein Referenzzement hergestellt. Seine Hauptbestandteile wurden auf einer halbertechnischen Labormahlanlage getrennt gemahlen, sodass Klinker und Hüttenessand eine Feinheit von jeweils 3800 cm<sup>2</sup>/g sowie ein RRSB-Steigungsmaß von n = 0,9 aufwiesen. Beide Komponenten wurden anschließend mit einem Sulfatträger zu einem Zement gemischt. Dieser Referenzzement zeigt im Vergleich zum Werkzement in jedem Prüfalalter höhere Mörteldruckfestigkeiten.

Im zweiten Schritt wurde der optimierte Zement hergestellt. Hierbei wurden die Mahlfineinheit und das RRSB-Steigungsmaß der Kornverteilung des Klinkers deutlich erhöht. Die Mahlfineinheit und das RRSB-Steigungsmaß der Kornverteilung des Hüttenessands wurden dagegen deutlich verringert. Auf diese Weise konnte die 2-d-Festigkeit erhöht und gleichzeitig die 28-d-Festigkeit auf unter 50 MPa gesenkt werden. Das 2-d-/28-d-Druckfestigkeitsverhältnis des optimierten Zements wurde – trotz konstanter Zementfeinheit und Zusammensetzung – von 0,27 (beim Werkzement) auf 0,36 angehoben.

**Portlandflugaschezemente**

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit von Betonen (siehe Kapitel V) mussten die Korngrößenverteilungen von flugaschehaltigen Portlandkompositzementen optimiert werden. Die Verarbeitungseigenschaften und die Festigkeitsentwicklung der aus ihnen hergestellten Betone sollten einer praxisgerechten Leistungsfähigkeit angepasst werden. Die Optimierung der Zemente sollte ausschließlich über die Korngrößenverteilung des Klinkers durchgeführt werden. Es kamen insgesamt drei verschiedene Flugaschen (V1, V2 und V3) sowie ein Klinker zum Einsatz. Eine besondere Herausforderung stellten die Zemente mit sehr grober Steinkohlenflugasche (V3) bzw. die Zemente mit 35 M.-% Steinkohlenflugasche dar.

Flugasche als Zementhauptbestandteil reagiert in den ersten Tagen der Zementhydratation sehr träge und wirkt zunächst wie ein inerte Zumahlstoff. Daher haben sowohl ein hoher Flugaschegehalt als auch eine geringe Flugascheinheit bis zu einem Prüfalalter von 28 Tagen ungünstige Auswirkungen auf die Festigkeitsentwicklung von Portlandflugaschezementen. Mit einer höheren Klinkerfeinheit ist dieser Einfluss



**Bild III-16:** Mörteldruckfestigkeit von Portlandflugaschezementen in Abhängigkeit vom Prüfalalter; a) mit 30 M.-% Steinkohlenflugasche unterschiedlicher Feinheit; b) mit 20 bis 35 M.-% Steinkohlenflugasche

nur begrenzt zu kompensieren. Bessere Effekte zeigt eine deutliche Erhöhung des RRSB-Steigungsmaßes der Korngrößenverteilung des Klinkers.

**Bild III-16 a)** stellt die Druckfestigkeit von Portlandflugaschezementen mit 30 M.-% Flugasche in Abhängigkeit vom Prüfalalter dar. Die verwendete Flugasche V1 wies eine Feinheit von 4 700 cm<sup>2</sup>/g auf, die Flugasche V3 besaß dagegen nur eine Feinheit von 3 350 cm<sup>2</sup>/g. Zunächst wurden aus den Flugaschen, einem Klinkermehl breiter Korngrößenverteilung (n = 0,75) und der Mahlfinheit von 4 500 cm<sup>2</sup>/g sowie einem Sulfatträger zwei Zemente (30 % V1 und 30 % V3) hergestellt. Die Zemente zeigten insbesondere im Alter von 7 und 28 Tagen ein geringes Festigkeitsniveau. Darüber hinaus wurde aufgrund des Feinheitsunterschieds der beiden Flugaschen eine Festigkeitsdifferenz von etwa 3 MPa ermittelt. Anders verlief die Festigkeitsentwicklung des optimierten Zements mit der Flugasche V3 (30 % V3 optimiert). Hier betrug die Feinheit des Klinkers nur etwa 4 100 cm<sup>2</sup>/g, allerdings wurde seine Korngrößenverteilung deutlich enger, d. h. auf ein RRSB-Steigungsmaß von n = 1 eingestellt. Dies hatte einen erheblichen Einfluss auf die Korngrößenverteilung des optimierten Zements, auf dessen Wasseranspruch und die Festigkeitsentwicklung. Der Wasseranspruch zur Erzielung der Normsteife nahm von 27 M.-% auf 33 M.-% zu. Es wurde eine 2-d-Druckfestigkeit von 26 MPa und eine 28-d-Druckfestigkeit von 48 MPa erreicht. Die mit dem optimierten Zement hergestellten Betone wiesen im Vergleich zu Referenzbetonen keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Verarbeitbarkeit oder der Festigkeitsentwicklung auf.

**Tafel III-6:** Granulometrische Zusammensetzung von Portlandflugaschezementen mit 20 bis 35 M.-% Steinkohlenflugasche

Zement	Flugasche V2		Klinker	
	Anteil in M.-%	Feinheit in cm <sup>2</sup> /g	Feinheit in cm <sup>2</sup> /g	n
20 % V2	20	4 000	4 000	ca. 0,8
25 % V2	25	4 000	4 000	ca. 0,8
30 % V2	30	4 500	4 500	ca. 0,8
35 % V2	35	4 500	4 500	ca. 0,8
35 % V2 optimiert	35	4 080	4 080	ca. 1,0

n: RRSB-Steigungsmaß der Korngrößenverteilung

In weiteren Untersuchungen wurden die Auswirkungen des Flugaschegehalts auf die Zementeigenschaften ermittelt. Die Feinheit der hier verwendeten Flugasche V2 lag bei 3 700 cm<sup>2</sup>/g. **Tafel III-6** zeigt eine Übersicht der Versuchsparameter. Die im Rahmen dieser Versuchsreihe eingesetzten Zemente mit der Flugasche V2 sollten ebenfalls ausschließlich über die Korngrößenverteilung des Klinkers optimiert werden. Die Druckfestigkeit der Zemente zu verschiedenen Prüfterminen ist in **Bild III-16 b)** dargestellt. Die Erhöhung des Flugaschegehalts von 20 auf 35 M.-% führte zu einem deutlich geringeren Festigkeitsniveau in jedem Prüfalalter. Erst durch den Einsatz eines Klinkermehls mit engerer Korngrößenverteilung (siehe Zement 35 % V2 optimiert) konnten die ungünstigen Auswirkungen des höheren Flugaschegehalts kompensiert werden. Dieser Zement erzielte trotz seines Flugaschegehalts von 35 M.-% ein dem Zement mit 20 M.-% Flugasche vergleichbares Festigkeitsniveau. Die beschriebene einfache Art der Optimierung, an der zunächst nur ein Hauptbestandteil (Klinker) beteiligt war, hatte jedoch einen zunehmenden Wasseranspruch zur Erzielung der Normsteife

zur Folge. Wegen des höheren RRSB-Steigungsmaßes der Korngrößenverteilung des Klinkers nahm der Wasseranspruch des Zements von 26 auf 31 M.-% zu.

Mit den beschriebenen Beispielen konnte belegt werden, dass die Zementoptimierung (bei unveränderter Zementzusammensetzung) durch Variation der Korngrößenverteilungen der jeweiligen Hauptbestandteile möglich ist. Bei der granulometrischen Optimierung sollten allerdings die Korngrößenverteilungen aller Zementhauptbestandteile mit einbezogen werden, um beispielsweise eine Erhöhung des Wasseranspruchs der Zemente zu vermeiden.

### Untersuchungen zur Hydratation von Zementklinkerphasen ■

Die Weiterentwicklung leistungsfähiger Zemente ist auch in Zukunft eine wichtige Aufgabe der Zementindustrie. Grundlage hierfür sind Erkenntnisse über die Reaktionen der einzelnen Klinkerphasen und ihre Wechselwirkungen untereinander während der Hydratation. Trotz jahrzehntelanger

Forschung auf diesem Gebiet konnten aber viele Fragen bis heute aus verschiedenen Gründen nicht vollständig beantwortet werden.

Zur Untersuchung des Hydratationsverhaltens von Portlandzementklinkern sind häufig Klinker mit gezielt eingestellter Phasenzusammensetzung nötig. Die Herstellung solcher Zementklinker durch Klinkerbrände im Labor ist aber schwierig und wenig praktikabel. Deshalb stellt sich die Frage, ob die Hydratation eines Gemischs aus synthetischen Klinkerphasen dem eines technischen Klinkers bzw.

Zements gleicht. Wäre dies der Fall, ließen sich durch gezielte Veränderungen von Gemischzusammensetzungen die Hydratationseigenschaften verschiedener Zementklinker auf einfache Weise untersuchen. Außerdem könnten durch unterschiedliche Phasenzusammensetzungen verursachte Veränderungen des Hydratationsverhaltens frühzeitig durch Laborversuche und nicht erst durch großtechnische Versuche oder Praxiserfahrungen erkannt werden.

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde deshalb im Forschungsinstitut das Reaktionsverhalten eines Gemischs aus Klinkerpha-

sen (kurz: Klinkergemisch) mit dem eines im Labormaßstab gebrannten Klinkers (kurz: Laborklinker) und eines technischen Klinkers verglichen. Entsprechend wurden auch Klinkerphasenmischungen mit Sulfatträger (kurz: Zementgemisch) und technische Zemente untersucht. Es wurden jeweils Hydratationsversuche durchgeführt und die entstandenen Reaktionsprodukte anschließend charakterisiert.

Technische Klinker bestehen nicht aus chemisch-mineralogisch reinen Klinkerphasen, sondern enthalten auch immer Neben- und Spurenelemente. Deshalb wurden im Labor nicht nur reine, sondern auch dotierte Klinkerphasen hergestellt. Durch diese gezielte Dotierung konnte der Einfluss typischer Fremdbestandteile auf die Reaktivität der Klinkerphasen untersucht werden. Die synthetisierten Phasen wurden jeweils gesondert und als Gemische hydratisiert und diese Reaktion nach bestimmten Zeiten durch Zugabe von Aceton und Diethylether abgebrochen. Die so konservierten Hydratationsprodukte konnten anschließend mit denen von Labor- und Werksklinkern bzw. daraus hergestellten Zementen verglichen werden. Die Charakterisierung erfolgte vor allem thermoanalytisch mit der Dynamischen Differenz-Kalorimetrie (DSC). Ergänzend wurden u. a. röntgendiffraktometrische und rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen durchgeführt.

**Tafel III-7: Synthetisierte Klinkerphasen und erzielte Reinheiten (Angaben nach Röntgendiffraktometrie mit Rietveld-Auswertung)**

Klinkerphase	Gewünschtes Produkt in M.-%	Freier Kalk in M.-%	Nebenprodukte in M.-%
C <sub>3</sub> S	99,8	0,2	-
C <sub>3</sub> S-d	99,9	0,1	-
C <sub>2</sub> S	100	-	-
C <sub>2</sub> S-d	90,8	0,1	9,1 <sup>1)</sup>
C <sub>3</sub> A	98,0	2,0	-
C <sub>3</sub> A-d	96,8	3,2	-
C <sub>4</sub> AF	97,8	-	2,2
C <sub>4</sub> AF-d	97,9	-	2,1

<sup>1)</sup> Nebenprodukte sind die nahezu nicht hydraulischen Calciummagnesiumsilikate Bredgit (Ca<sub>3</sub>Mg(SiO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>) und Merwinit (Ca<sub>3</sub>Mg(SiO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>)

**Tafel III-8: Zusammensetzung der aus den synthetisierten Klinkerphasen erzeugten Mischungen (-s = Sulfatträgerzugabe, -d = dotiert, KG = Klinkergemisch, ZG = Zementgemisch)**

Name der Mischung (Abkürzung)	Anteil der Klinkerphasen in M.-%								SO <sub>3</sub> in M.-%
	C <sub>3</sub> S	C <sub>3</sub> S-d	C <sub>2</sub> S	C <sub>2</sub> S-d	C <sub>3</sub> A	C <sub>3</sub> A-d	C <sub>4</sub> AF	C <sub>4</sub> AF-d	
C <sub>3</sub> S+C <sub>2</sub> S	83,3		16,7						
C <sub>3</sub> S+C <sub>2</sub> S-d		83,3		16,7					
C <sub>3</sub> A-s					72,7				27,3
C <sub>3</sub> A-s-d						72,7			27,3
C <sub>4</sub> AF-s-d								86,5	13,5
C <sub>3</sub> S+C <sub>3</sub> A	85,5				14,5				
C <sub>3</sub> S+C <sub>3</sub> A-d		85,5				14,5			
C <sub>3</sub> S+C <sub>3</sub> A-s	C <sub>3</sub> S+C <sub>3</sub> A, relative Zusammensetzung wie oben								3,95
C <sub>3</sub> S+C <sub>3</sub> A-s-d	C <sub>3</sub> S+C <sub>3</sub> A-d, relative Zusammensetzung wie oben								3,95
C <sub>3</sub> S+C <sub>4</sub> AF	89,1						10,9		
C <sub>3</sub> A+C <sub>4</sub> AF					57,9		42,1		
KG	67		19		9		5		
KG-d		67		19		9		5	
ZG	KG, relative Zusammensetzung wie oben								3,0
ZG-d	KG-d, relative Zusammensetzung wie oben								3,0

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass mithilfe der Hydratation von Klinker- und Zementgemischen Vorhersagen über die Hydratation der entsprechend zusammengesetzten technischen Produkte möglich sind. Der Hydratationsverlauf eines Klinkerphasengemischs entspricht erstaunlich gut dem eines technischen Klinkers bzw. Zements gleicher Zusammensetzung.

Ob neben den chemisch-mineralogischen Eigenschaften auch die physikalischen Leistungsmerkmale (insbesondere die Festigkeitsentwicklung) eines Zementgemischs denen eines entsprechenden technischen Produkts gleichen, muss noch in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

#### Herstellung reiner und dotierter Klinkerphasen

Als Ausgangsstoffe für die Hydratationsversuche wurden alle vier Hauptklinkerphasen (Tricalciumsilikat, Dicalciumsilikat, Tricalciumaluminat und Tetracalciumaluminatferrit) rein sowie mit Fremdbestandteilen dotiert synthetisiert. Der Einbau von Metallionen wie Natrium, Kalium, Magnesium, Aluminium und Eisen

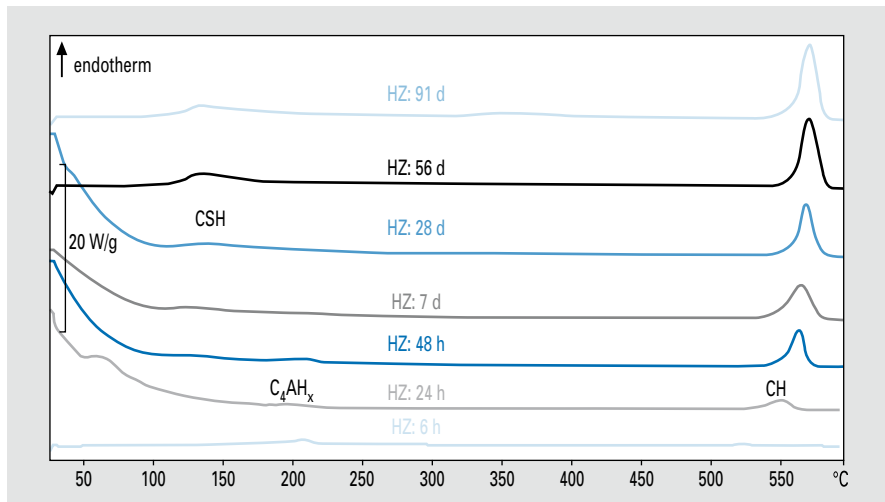
in das Kristallgitter einer Klinkerphase kann zu Modifikationsänderungen führen, die eine veränderte Reaktivität bewirken. Deshalb wurden die Dotierungen jeweils so vorgenommen, dass die Zusammensetzung der synthetischen Phase der einer typischen Klinkerphase in technischem Portlandzementklinker möglichst nahe kommt. Die Herstellung der Klinkerphasen erfolgte durch Brennen fein gemahlener und anschließend granulierter Ausgangssubstanzen. Für einzelne Phasen waren für eine befriedigende Ausbeute bis zu drei Wiederholungsbrände erforderlich, vor denen das gebrannte Material jeweils erneut gemahlen und verdichtet wurde. In **Tafel III-7** sind die hergestellten Klinkerphasen und deren Reinheit aufgeführt. Dotierungen sind durch das Suffix „-d“ gekennzeichnet.

**Vergleich der Hydratationsprodukte von Klinkerphasen, Klinkerphasenmischungen, Labor- und Werksklinkern**

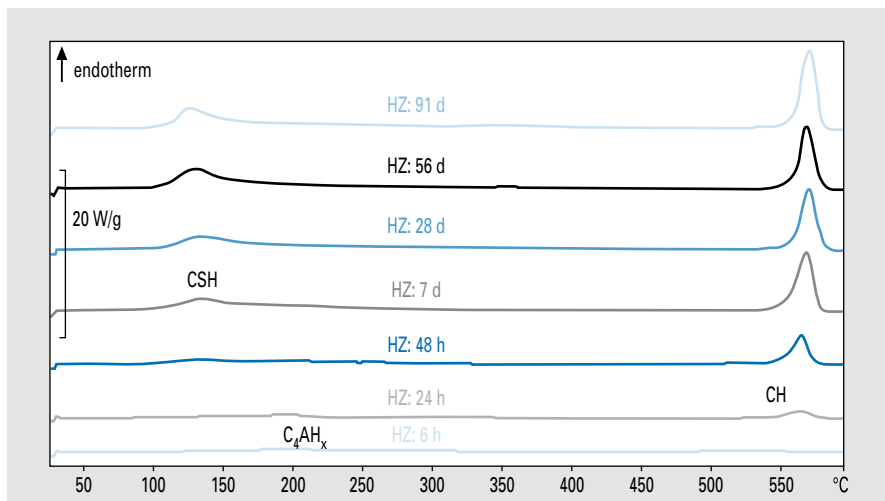
Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurden die vier Hauptklinkerphasen einzeln und als Phasengemische mit verschiedenen Wasser/Feststoff-Werten hydratisiert. Darüber hinaus wurden auch Laborklinker, technische Klinker und Zemente zur Hydratation gebracht (**Tafel III-8**). Die so erzeugten Hydratationsprodukte wurden nach der Aufbereitung auf ihre chemisch-mineralogische Zusammensetzung hin untersucht und verglichen. Dabei konnte festgestellt werden, dass das Reaktionsverhalten eines Klinkergemischs dem eines technischen Klinkers gleicher Zusammensetzung entspricht. Gleiches gilt für die Hydratation eines Zementgemischs und des entsprechenden technischen Zements.

Dicalciumsilikat ( $C_2S$ ) und Tetracalciumaluminatferrit ( $C_4AF$ ) sind in Anwesenheit der anderen Klinkerphasen weniger reaktiv, als wenn sie isoliert hydratisiert werden. Die Zementhydratation wird demnach überwiegend durch die Reaktion der Phasen Tricalciumsilikat ( $C_3S$ ) und Tricalciumaluminat ( $C_3A$ ) bestimmt. Dieses Phänomen wird durch das Verhalten aller vier Klinkerphasen bei der Hydratation eines Klinkergemischs bestätigt. Die Phasen beeinflussen sich etwa so, wie dies auch bei Mischungen aus  $C_3S$  und  $C_3A$  beobachtet werden kann. Der Vergleich der DSC-Thermogramme in den **Bildern III-17** und **III-18** verdeutlicht dies.

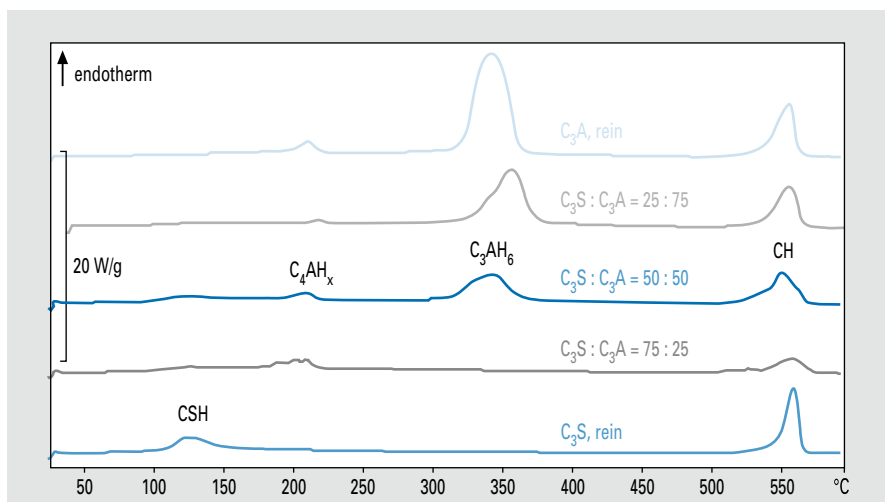
Bild III-17 zeigt die Thermogramme eines  $C_3S/C_3A$ -Gemischs, das den Masseverhältnissen in einem Portlandzementklinker



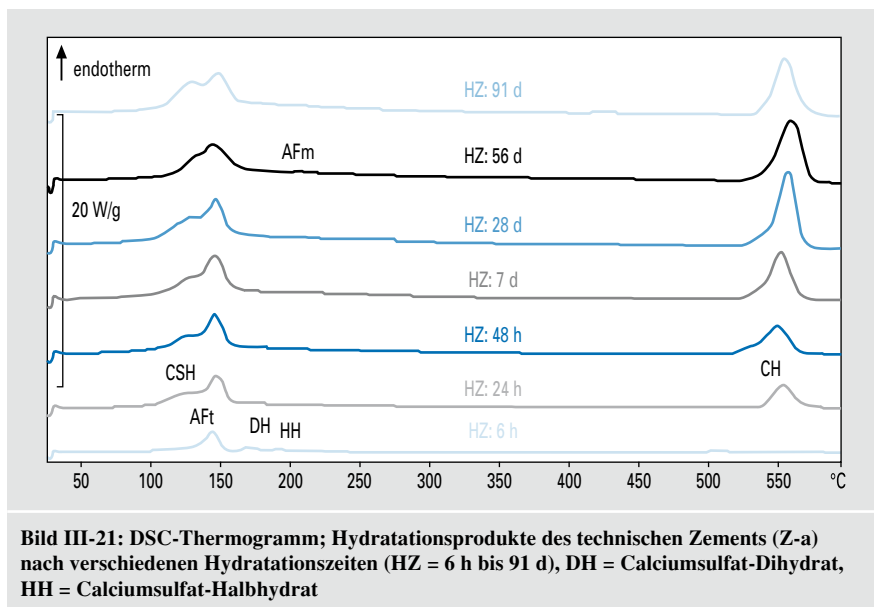
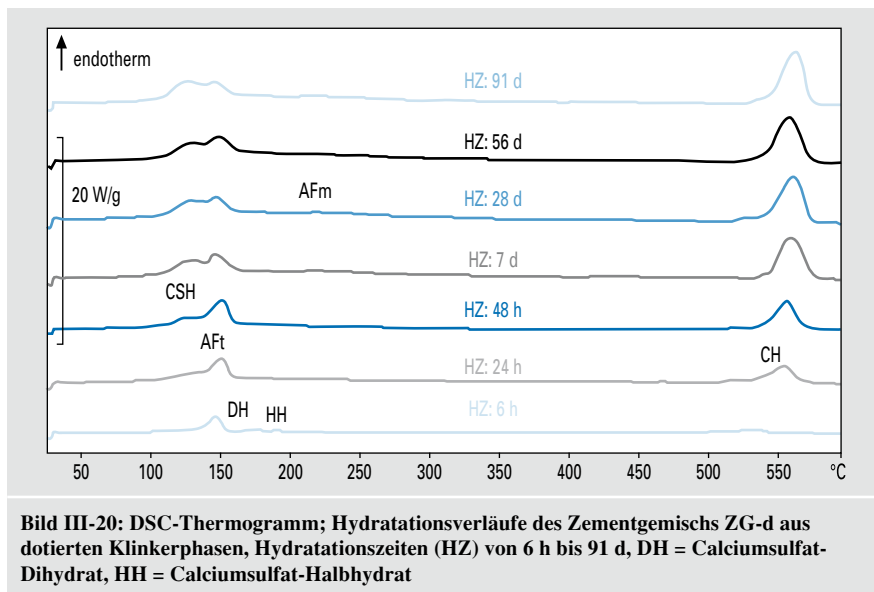
**Bild III-17: DSC-Thermogramm; Hydratationsverlauf einer Mischung aus dotiertem Tricalciumsilikat und Tricalciumaluminat, Hydratationszeiten (HZ) von 6 h bis 91 d**



**Bild III-18: DSC-Thermogramm; Hydratationsprodukte des dotierten Klinkergemischs KG-d nach verschiedenen Reaktionszeiten (HZ = 6 h bis 91 d)**



**Bild III-19: DSC-Thermogramm; Vergleich der Hydratationsprodukte einer  $C_3S/C_3A$ -Mischungsreihe, die Verhältnisse beider Phasen sind im Thermogramm angegeben, Reaktionszeit jeweils 24 h**



entspricht. Im frühen Hydratationsstadium bis zu einer Hydratationszeit von sechs Stunden bilden sich zunächst hexagonale Calciumaluminathydrate variabler Zusammensetzung ( $C_4AH_x$ ). Die Bildung von Calciumsilikathydraten (CSH) und Calciumhydroxid (CH) aus dem Tricalciumsilikat wird durch die Anwesenheit des Aluminats verlangsamt. Umgekehrt beeinflusst aber auch das Silikat die Hydratation des Tricalciumaluminats. **Bild III-19** zeigt die DSC-Thermogramme von  $C_3S/C_3A$ -Gemischen mit jeweils variiertem Phasenanteil nach 24-stündiger Hydratation. Überwiegt das Silikat im Gemisch, so bilden sich keine kubischen Calciumaluminathydrate ( $C_3AH_6$ ) mehr.

Im Gemisch aus vier synthetischen dotierten Klinkerphasen (Bild III-18), dessen Zusammensetzung der eines technischen Klinkers entspricht, entstehen während

der Hydratation innerhalb von 91 Tagen die gleichen Reaktionsprodukte wie bei einer Mischung aus Tricalciumsilikat und Tricalciumaluminat. Auch die Menge der entstehenden Hydratphasen ist in beiden Systemen vergleichbar. Die beiden anderen Phasen im Klinkergemisch (Dicalciumsilikat und Tetracalciumaluminatferrit) haben demnach einen deutlich untergeordneten Einfluss.

#### Vom Klinker zum Zement

Während der Hydratation des untersuchten technischen Klinkers bilden sich sowohl qualitativ als auch quantitativ dieselben Hydratationsprodukte wie bei der Reaktion des Klinkergemischs und des Laborklinkers.

Versuche mit Zementen ergeben, dass auch die Hydratation eines technischen Zements der eines Zementgemischs entsprechender

Zusammensetzung gleicht. Dies zeigt der Vergleich der DSC-Thermogramme in den **Bildern III-20** und **III-21**. Beide Abbildungen dokumentieren außerdem, dass in den ersten Stunden der Hydratation eines Zements vor allem Ettringit (AFt-Phase) gebildet wird. Nach 24-stündiger Reaktion ist auch die Bildung von CSH und Calciumhydroxid deutlich sichtbar. Besonders beim Zementgemisch geht nach längeren Reaktionszeiten der Gehalt an Ettringit zugunsten von Aluminatferrit-Monosulfat (AFm-Phase) zurück. Leichte Reaktivitätsunterschiede im Vergleich beider Ausgangsprodukte sind auf die Vergesellschaftung der Klinkerphasen im technischen Zement zurückzuführen.

#### Abbruch der Hydratationsreaktionen

Durch das Abbrechen des Hydratationsvorgangs sollen der jeweilige Hydratationsgrad einer Probe konserviert und die entstandenen Reaktionsprodukte für spätere Untersuchungen vorbereitet werden. Im Forschungsinstitut der Zementindustrie werden hydratisierende Proben zu diesem Zweck mit Aceton behandelt und anschließend mit Diethylether getrocknet. Die Effizienz dieses Verfahrens wurde mit Fokus auf die Einwirkzeit der verwendeten Chemikalien und die Art der Lagerung nach dem Hydratationsabbruch überprüft.

Die thermoanalytischen Untersuchungen legen nahe, dass durch die beschriebene Probenbehandlung überschüssiges Wasser unter Umständen nur unvollständig aus der hydratisierenden Probe entfernt wird. Hierdurch hervorgerufene Fehler können aber durch eine einheitliche Probenbehandlung minimiert werden, die auch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gewährleistet.

Die Vorgänge in einem Klinkerkorn vor und während der Hydratation und deren Abbruch sind schematisch in **Bild III-22** dargestellt: Das zunächst unhydratisierte Klinkerphasenpartikel reagiert nach Wasserzutritt unter Ausbildung einer Schicht aus Hydratphasen. Während des Hydratationsabbruchs dringt das dafür verwendete Reagenz (Aceton) von außen nach innen ein und entzieht dem System das ungebundene Wasser. Dies geschieht aber nicht vollständig, sodass sich noch verfügbares Wasser in Kontakt mit dem nicht hydratisierten Teil des Klinkerphasenpartikels befindet. Während des folgenden Trocknungsvorgangs kann dieses Wasser weiter mit der Klinkerphase reagieren, sodass sich schließlich der im letzten Bildausschnitt dargestellte Zustand einstellt. Anschließend Lagerung bei Raumtemperatur

verändert dieses Teilchen nicht mehr. Sein Reaktionsfortschritt entspricht aber nicht demjenigen zum Zeitpunkt des beabsichtigten Hydrationsabbruchs. Dieser Umstand ist bei der weiteren Vorgehensweise und der Interpretation von Analyseergebnissen zu berücksichtigen.

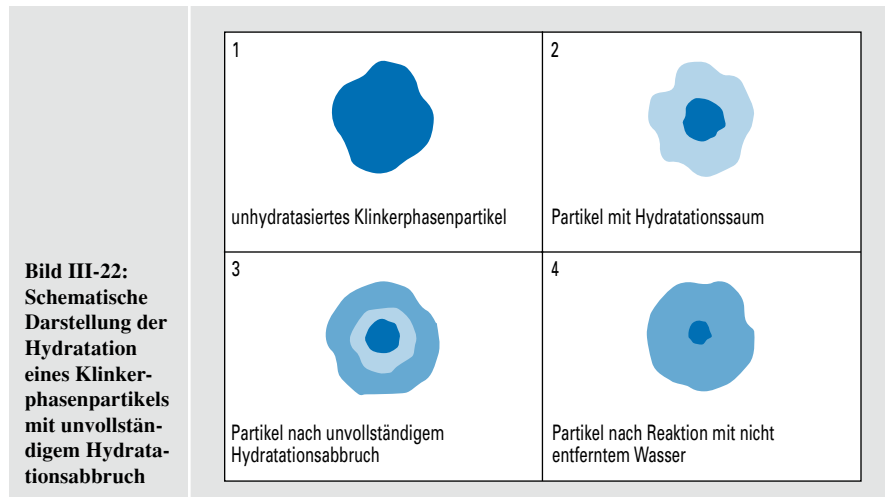
### Signallagen der Entwässerungsreaktionen in der Dynamischen Differenz-Kalorimetrie (DSC)

Für einen Einsatz der DSC über den Routinebetrieb hinaus ist die genaue Kenntnis der Entwässerungstemperaturen der im Zementssystem vorkommenden Hydratphasen wichtig. Die Lage und Form des DSC-Signals einer Phase verschiebt sich aber nicht nur durch den Einfluss der sie umgebenden Matrix, sondern hängt außerdem von einer Reihe weiterer Faktoren ab. Beispielsweise werden die Signale durch höhere Heizraten größer, breiter und zu höheren Temperaturen verschoben. Aus diesen Gründen sind mittels DSC ermittelte Entwässerungstemperaturen grundsätzlich als geräte- bzw. versuchsspezifische Daten anzusehen.

### Röntgenographische Quantifizierung von Hüttensand in Zement ■

Die Röntgenpulverdiffraktometrie ist als leistungsfähiges Analyseverfahren in den vergangenen Jahren zunehmend in das Zentrum des Interesses industrieller Anwender gerückt. In der Zementindustrie liegt diese Entwicklung u. a. darin begründet, dass mithilfe moderner Detektoren nun die apparativen Voraussetzungen gegeben sind, um innerhalb weniger Minuten Aussagen über die Phasenzusammensetzung der untersuchten Proben zu erhalten. Zudem wurden leistungsfähige Softwarepakete für die Auswertung entwickelt, deren Funktionen weitgehend automatisierbar sind, und die zur Lösung vielfältiger Aufgaben, wie beispielsweise der Produktüberwachung, genutzt werden können.

Eine wesentliche Herausforderung liegt in der quantitativen Bestimmung der Hauptbestandteile von Zement. Wachsende Marktanteile von CEM II- und CEM III-Zementen haben zu einem erhöhten Bedarf an zuverlässigen, anwenderfreundlichen und möglichst universell einsetzbaren Verfahren zur Bestimmung der Zementzusammensetzung geführt. Neuere Ansätze zur Quantifizierung des Hüttensandgehalts, die auf der Röntgendiffraktometrie beruhen, haben das Potenzial, sich als leistungsfähige und hinreichend zuverlässige Alternative zu den bisherigen Analysemethoden



zu etablieren. Daher wurden die Einsatzmöglichkeiten röntgendiffraktometrischer Verfahren im Forschungsinstitut eingehend untersucht.

### Bislang verfügbare Bestimmungsmethoden

In der europäischen Vornorm DIN V ENV 196-4 werden Prüfverfahren zur quantitativen Bestimmung der Bestandteile von Zementen beschrieben. Demnach kann der Hüttensandanteil mithilfe des selektiven Lösens, mittels Dichtentrennung oder mikroskopisch ermittelt werden. Alle drei Verfahren sind mit großem Aufwand verbunden.

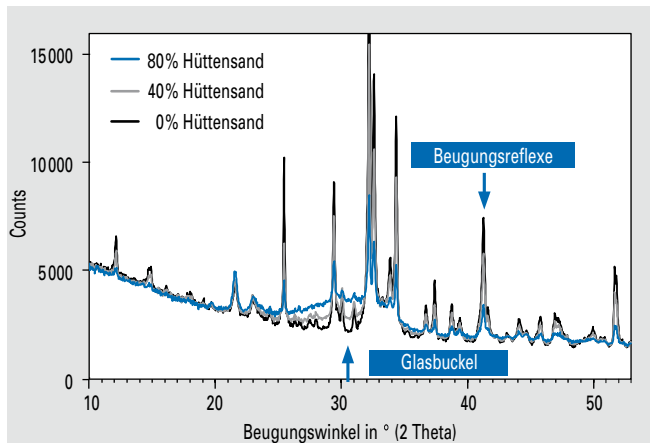
Grundlage des selektiven Löseverfahrens, das in der Vornorm als Referenzmethode vorgesehen ist, sind die unterschiedlichen Löslichkeiten der Zementbestandteile in Ethylendiamintetraessigsäure-Lösung (EDTE) bzw. in verdünnter Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ). Während Portlandzementklinker sowohl in EDTE-Lösung als auch in Salpetersäure vollständig löslich ist, wird das Hüttensandglas nur in Salpetersäure gelöst und verbleibt bei Behandlung mit EDTE-Lösung im Rückstand. Zusätzlich sind die Anteile an Sulfat und Kohlenstoffdioxid im Zement sowie ggf. der Sulfid-Gehalt im Zement und im EDTE-Rückstand zu bestimmen, um das Analyseergebnis auf die Summe aller Haupt- und Nebenbestandteile ohne Berücksichtigung von Calciumsulfat zu beziehen. Trotz dieses vergleichsweise großen analytischen Aufwands kann eine erhöhte Messunsicherheit entstehen, wenn beispielsweise der Hüttensand größere Mengen kristalliner Bestandteile enthält, die erfahrungsgemäß ebenfalls EDTE-löslich sein können.

Beim Dichtentrennverfahren werden die Zementbestandteile durch Suspension in

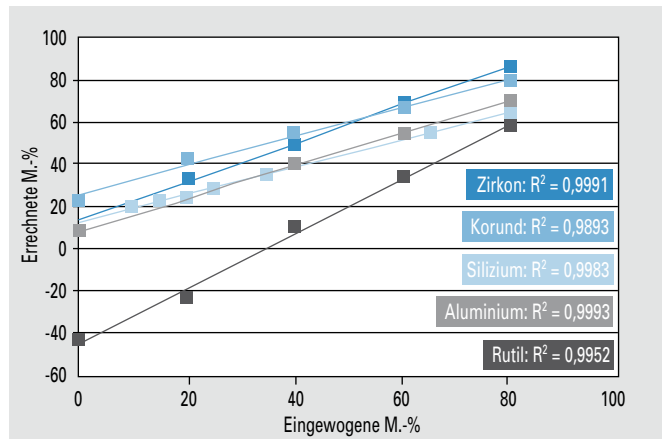
unterschiedlichen Schwerelösungen voneinander separiert. Anschließend wird die Konzentration eines Leitbestandteils im Zement, in der Klinker- und in der Hüttensandfraktion bestimmt und daraus der Hüttensandanteil des Zements berechnet. Bei den als Schwerelösungen einzusetzenden Substanzen handelt es sich um Diiodmethan, Dibutylphthalat und Bromoform, die aufgrund ihrer Giftigkeit besondere Schutzmaßnahmen im Labor erfordern. Daher kommt das Dichtentrennverfahren derzeit praktisch nicht zur Anwendung.

Das lichtmikroskopische Auszählen hat sich bei hüttensandhaltigen Zementen, die durch gemeinsames Mahlen der Bestandteile hergestellt werden, als zuverlässige Methode erwiesen. Die Untersuchung erfolgt an einer abgeseibten Kornfraktion. In der Regel ist jedoch davon auszugehen, dass die Zusammensetzungen dieser Kornfraktion und des unfraktionierten Zements nicht identisch sind. Das Zählergebnis muss daher mithilfe der chemischen Analysen der Fraktion und des Zements korrigiert werden. Durch das zunehmende getrennte Mahlen und anschließende Mischen von Klinker und Hüttensand können die Hauptbestandteile stark in bestimmten Kornfraktionen angereichert werden. In diesen Fällen kann das mikroskopische Verfahren trotz Korrekturrechnungen mit erheblichen Einbußen in der Genauigkeit verbunden sein.

Ein weiteres, vor allem in der werkseitigen Produktionskontrolle verbreitetes Verfahren beruht auf der Berechnung der Zementzusammensetzung anhand von Leitverbindungen. Hierzu wird ein lineares Gleichungssystem erstellt und gelöst, das auf den chemischen Analysen aller Zementbestandteile sowie des Zements selbst beruht. Als Leitverbindungen werden die-



**Bild III-23: Beitrag des Hüttensands zum Untergrundverlauf in Röntgendiffraktogrammen hüttensandhaltiger Zemente**



**Bild III-24: Vergleich der errechneten mit den tatsächlichen Hüttensandgehalten in Zementen bei der Rietveld-Auswertung mit innerem Standard – Einfluss unterschiedlicher Spike-Substanzen**

jenigen Komponenten ausgewählt, deren Gehalte in je einem der Zementbestandteile charakteristisch hohe bzw. niedrige Werte aufweisen. Zur Bestimmung der Zusammensetzung anhand von Leitverbindungen ist die separate Verfügbarkeit aller Zementbestandteile erforderlich. Daher ist diese Methode nicht ohne Weiteres im Rahmen der Fremdüberwachung einsetzbar. Die Richtigkeit des Bestimmungsergebnisses hängt zudem von der Analysengenauigkeit und von der Gleichmäßigkeit der Bestandteile ab.

### Röntgendiffraktometrische Hüttensandbestimmung

Hüttensandglas besitzt keine geordnete kristalline Gitterstruktur. Der Hüttensand bewirkt im Röntgendiffraktogramm eine buckelförmige Erhöhung des Untergrundverlaufs im Winkelbereich zwischen etwa 22 und 38° (2 Theta). Scharfe Beugungsreflexe werden ausschließlich durch die kristallinen Bestandteile eines hüttensandhaltigen Zements erzeugt und verlieren mit zunehmendem Hüttensandgehalt an Intensität zugunsten des Glasbuckels (**Bild III-23**).

Obwohl das Hüttensandglas röntgenamorph ist, bestehen verschiedene Möglichkeiten, den Hüttensandanteil in Portlandhütten- und Hochofenzementen mithilfe der Röntgenbeugung systematisch und mit vergleichsweise geringem Aufwand zu bestimmen. Eine Möglichkeit besteht darin, eine kristalline Substanz als inneren Standard („Spike“) zuzugeben und das Diffraktogramm der Mischung mittels Rietveld-Verfeinerung auszuwerten. Mit dieser Methode kann die quantitative Phasenzusammensetzung aller berücksichtigten kristallinen Phasen ermittelt werden. Bei der Berechnung ergibt die Summe aller während der Verfeinerung berücksich-

tigten kristallinen Phasen grundsätzlich 100 M.-%. Anhand der Abweichung des berechneten Gehalts an innerem Standard von der tatsächlichen Einwaage lässt sich der Hüttensandgehalt ermitteln.

Die röntgendiffraktometrische Bestimmung des Hüttensandgehalts kann auch ohne Zugabe eines inneren Standards erfolgen, indem der Intensitätsbeitrag des Glasbuckels zum Diffraktogramm direkt ausgewertet wird. Dabei kann entweder die absolute Röntgenintensität bei einem reflexfreien Beugungswinkel oder die integrale Untergrundintensität über den gesamten buckelförmigen Bereich ausgewertet und kalibriert werden. Bei der Auswertung der absoluten Intensität haben sich die Winkellagen bei 28,5° und bei 30,5° (2 Theta) als besonders geeignet erwiesen. Die integrale Auswertung des Glasbuckels kann beispielsweise erfolgen, indem ein zusätzlicher, asymmetrischer und breiter Peak in die Rietveld-Auswertung eingebunden wird. Die bei der Verfeinerung errechnete Peakfläche lässt sich, ähnlich wie bei der Auswertung der absoluten Intensität, anhand einer Serie von geeigneten Referenzproben kalibrieren.

Alle ausschließlich auf der Untergrund-erhöhung basierenden Methoden zur Bestimmung des Hüttensandgehalts können nur dann angewendet werden, wenn der Glasanteil des Hüttensands konstant ist. Bei wechselnden Gehalten an kristallinen Hüttensandbestandteilen, zu denen beispielsweise Merwinit ( $\text{Ca}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$ ), Melilith ( $\text{Ca}_2(\text{Mg,Al})(\text{Al,Si})_2\text{O}_7$ ) oder Bredigit ( $\text{Ca}_7\text{Mg}(\text{SiO}_4)_4$ ) gehören können, ist die Methode des inneren Standards von Vorteil. Da die genannten Phasen nicht in der Klinkerkomponente genormter Zemente vorkommen, werden sie, wenn sie bei der Auswertung mithilfe der Rietveld-Metho-

de nicht mitverfeinert werden, vollständig dem Hüttensand zugerechnet.

### Rietveld-Verfeinerung mit innerem Standard

Im Forschungsinstitut der Zementindustrie wurden aus Klinker, Hüttensand und Sulfat-träger Laborzemente mit Hüttensandgehalten von bis zu 80 M.-% hergestellt und jeweils mit 10 M.-% eines inneren Standards („Spike“) versetzt. Zunächst kamen versuchsweise Korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Rutil ( $\text{TiO}_2$ ), Zirkon ( $\text{ZrSiO}_4$ ), elementares Aluminium (Al) und Silizium (Si) als Spike-Materialien zum Einsatz, um den Einfluss der chemischen und granulometrischen Beschaffenheit des Spike-Materials auf das Ergebnis der Quantifizierung zu untersuchen. Die Röntgendiffraktogramme der Mischungen wurden mithilfe der Rietveld-Methode ausgewertet. Aus den ermittelten kristallinen Phasengehalten wurde jeweils derjenige Hüttensandgehalt errechnet, der dem zugegebenen Spike-Gehalt von jeweils 10 % entspricht. **Bild III-24** zeigt die Kalibriergeraden, die sich beim Einsatz der unterschiedlichen Spike-Substanzen zur Bestimmung des Hüttensandgehalts ergeben. Die Linearität der Korrelationen zwischen berechnetem und tatsächlichem Hüttensandgehalt ist in allen Fällen, unabhängig vom Spike-Material, vergleichbar gut. Einzig die Lage und die Steigung der Kalibriergeraden unterscheiden sich bei verschiedenen Spikes beträchtlich. Vermutlich werden die beobachteten Einflüsse der Spike-Substanz auf die Kalibriergleichung maßgebend durch Matrixeffekte hervorgerufen, die auf chemisch bedingter Absorption in Verbindung mit Korngrößeneffekten beruhen. Folglich ist eine gleichmäßige, möglichst gut reproduzierbare Probenpräparation sicherzustellen.



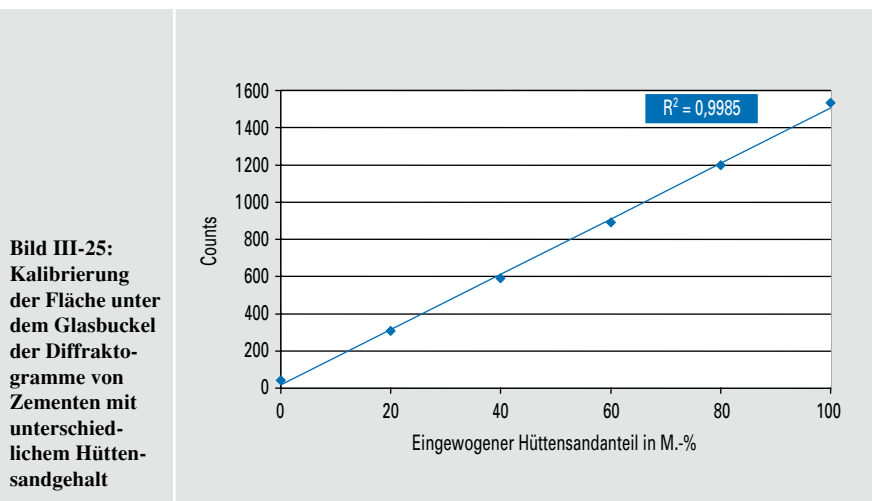
**Tafel III-9: Vergleich der röntgendiffraktometrischen Hüttensandbestimmung mittels Rietveld-Verfeinerung und Zugabe eines inneren Standards mit den eingewogenen Gehalten (Angaben in M.-%)**

Eingewogener Hüttensandanteil	Kalibrierung nach Rietveld-Verfeinerung mit Korund als innerem Standard	Kalibrierung nach Rietveld-Verfeinerung mit Rutil als innerem Standard	Kalibrierung nach Rietveld-Verfeinerung mit Zirkon als innerem Standard	Kalibrierung nach Rietveld-Verfeinerung mit Aluminium als innerem Standard	Kalibrierung nach Rietveld-Verfeinerung mit Silizium als innerem Standard
10,0	8,8	11,4	9,2	10,1	11,5
20,0	20,3	16,5	20,7	19,5	15,8
40,0	41,6	42,1	38,9	41,0	39,7
60,0	60,5	60,4	60,2	58,9	60,1
80,0	78,8	79,5	80,2	80,4	80,4
Mittlerer Fehler	0,96	1,58	0,61	0,62	1,30

**Tafel III-9** enthält die Ergebnisse der Hüttensandgehaltsbestimmungen, die aus den kalibrierten Messungen mit den verwendeten Spikes errechnet wurden. Es ergeben sich mittlere Abweichungen von 0,62 bis 1,58 M.-% für die Ergebnisse mit unterschiedlichen Spikes. Diese Werte liegen in derselben Größenordnung wie die Genauigkeiten der traditionellen Prüfverfahren. Die Methode der Rietveld-Verfeinerung mit innerem Standard ist demnach grundsätzlich für alle hüttensandhaltigen Zemente anwendbar, sofern deren kristalliner Phasenbestand vollständig bekannt ist. Nicht berücksichtigte Kristallphasen werden dem Hüttensandanteil zugerechnet und können daher zu Messungenauigkeiten führen, sofern sie nicht Bestandteil des Hüttensands selbst sind.

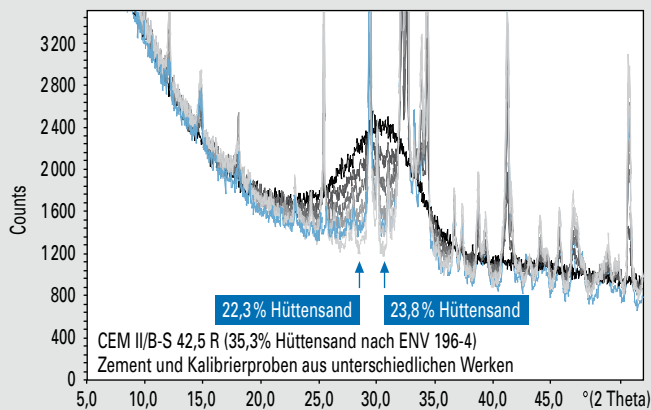
**Quantifizierung anhand des Intensitätsbeitrags zum Untergrund**

Durch Mischen von Portlandzement mit Hüttensand wurde eine weitere Serie von Kalibrierproben erstellt und röntgendiffraktometrisch untersucht. Der Glasbuckel wurde durch Anpassung eines zusätzlichen, breiten Einzelpeaks im Rahmen einer Rietveld-Verfeinerung ausgewertet. Da die Schwerpunktslage des Untergrundbuckels bei allen bekannten Hüttensanden identisch ist, wurde für den zusätzlichen Peak eine feste Winkelposition von 31,0° (2 Theta) angenommen. Die integrale Auswertung der Fläche unter dem Glasbuckel ergab eine lineare Abhängigkeit der Glasbuckelfläche vom Hüttensandgehalt, die sich über den gesamten Bereich genormter Hüttensandzemente erstreckt (**Bild III-25**). Ähnlich gute Korrelationen mit R<sup>2</sup>-Werten > 0,998 und entsprechend geringen mittleren Fehlern wurden bei der Auswertung der absoluten Röntgenintensität bei 28,5 bzw. 30,5° (2 Theta) erreicht (**Tafel III-10**).



**Tafel III-10: Vergleich der röntgendiffraktometrischen Hüttensandbestimmung mittels Auswertung der integralen Glasbuckel-Intensität und mittels Kalibrierung der Bruttointensität bei 28,5 bzw. 30,5° (2 Theta) mit den eingewogenen Gehalten (Angaben in M.-%)**

Einwaage	Kalibrierung der integralen Glasbuckel-Intensität	Kalibrierung der absoluten Intensität bei 28,5° (2 Theta)	Kalibrierung der absoluten Intensität bei 30,5° (2 Theta)
10,0	11,7	11,6	10,2
15,0	14,6	14,9	15,9
25,0	23,7	23,7	25,1
35,0	33,7	34,4	33,1
65,0	64,5	62,8	64,5
80,0	81,9	81,9	80,8
Mittlerer Fehler	1,20	1,28	0,73



**Bild III-26:** Röntgendiffraktogramm des industriell hergestellten CEM II/B-S 42,5 R (schwarz) im Vergleich mit den Kalibriermessungen der Laborzemente (grau)

Die zusätzliche Untersuchung einer Reihe von Proben aus verschiedenen Zementwerken hat jedoch gezeigt, dass die zugrunde liegende Kalibrierung nicht in jedem Fall auf Zemente unterschiedlicher Herkunft übertragbar ist. In **Bild III-26** sind die Röntgendiffraktogramme einer Kalibrierreihe aus Laborzementen und eines industriell hergestellten CEM II/B-S 42,5 R dargestellt, dessen Klinkerzusammensetzung sich von der Klinkerzusammensetzung der Kalibrierproben unterscheidet. Mittels selektiven Lösens wurde im Portlandhüttenzement ein Hüttensandgehalt von 35,5 M.-% ermittelt. Aus der Bewertung der absoluten Röntgenintensitäten resultierte bei  $28,5^\circ$  (2 Theta) ein Hüttensandanteil von 22,3 M.-% und bei  $30,5^\circ$  (2 Theta) ein Hüttensandanteil von 23,8 M.-%. Die starken Abweichungen der Resultate vom Referenzwert beim CEM II/B-S sind auf Absorptions-Effekte zurückzuführen, die im Wesentlichen auf der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung der Kalibrierproben gegenüber den zu bestimmenden Zementen beruhen. Die unterschiedliche Absorption der Röntgenstrahlung zeigt sich auch daran, dass der Untergrundverlauf der Messungen insgesamt, also auch außerhalb des „Glasbuckel“-Bereichs, voneinander abweicht. Erfahrungsgemäß ist der Absorptionseffekt bei Zementen mit hohem Hüttensandgehalt weniger stark ausgeprägt als bei Zementen mit hohem Klinkeranteil. Daher ist insbesondere bei der Untersuchung von Portlandhüttenzementen sicherzustellen, dass die chemische Zusammensetzung der Klinkerkomponente in den Kalibrierproben möglichst weitgehend mit derjenigen in den analysierten Zementen übereinstimmt.

Die dargelegten Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Röntgenpulverdiffraktometrie ein leistungsfähiges Verfahren für die Bestimmung des Hüttensandgehalts von Zement ist. Die Auswertung kann entweder über die Erhöhung des Untergrunds (Glasbuckel) erfolgen oder nach Zugabe eines inneren Standards. Mit allen hier beschriebenen röntgendiffraktometrischen Verfahren lassen sich sehr gute Genauigkeiten erreichen. Dabei erscheint die Methode des inneren Standards besonders geeignet für die Fremdüberwachung, da sie weitgehend unabhängig von Absorptionseffekten ist und ihre Genauigkeit nahezu ausschließlich von einer sorgfältigen Probenaufbereitung abhängt. Die Methoden zur direkten Bestimmung des Untergrunds ohne inneren Standard können hingegen vorzugsweise in der werkseigenen Produktionskontrolle angewandt werden, wenn die stofflichen Merkmale der Einsatzstoffe weitgehend konstant sind. Sie sind mit geringerem präparativen Aufwand verbunden und lassen sich darüber hinaus sehr gut in ein bestehendes Laborautomationssystem integrieren.

### Sulfatwiderstand ■

Für Zemente mit hohem Sulfatwiderstand, so genannte HS-Zemente, gibt es derzeit noch keine europäische Norm. In den meisten europäischen Ländern, so auch in Deutschland, gelten jedoch bestimmte Portland- und Hochofenzemente als HS-Zemente. Gemäß DIN 1164-10 sind dies Portlandzemente mit einem Gehalt an Tricalciumaluminat von maximal 3 M.-% und einem Aluminiumoxidgehalt von maximal 5 M.-% sowie Hochofenzemente mit einem

Mindesthüttensandgehalt von 66 M.-%. In der Norm DIN 1045-2 wird festgelegt, dass bei einem Sulfatangriff von 600 mg/l Sulfat oder mehr im angreifenden Wasser (Angriffsklasse XA2) ein HS-Zement zur Herstellung des Betons zu verwenden ist. Bleibt die Sulfatkonzentration des angreifenden Wassers unter 1500 mg  $\text{SO}_4/\text{l}$ , so können alternativ auch bestimmte Mischungen aus Zement und Steinkohlenflugasche verwendet werden.

Die Prüfung des Sulfatwiderstandverhaltens im Labor erfolgt in Deutschland traditionell mit den Schnellprüfverfahren nach Wittekindt oder nach Vorgabe des Sachverständigenausschusses des DIBt (SVA-Verfahren) bei einer Prüftemperatur von  $20^\circ\text{C}$ . Seit wenigen Jahren werden die Prüfungen jedoch nicht nur bei  $20^\circ\text{C}$ , sondern zusätzlich auch bei einer niedrigeren Temperatur durchgeführt, vorzugsweise bei  $5$  oder  $8^\circ\text{C}$ . Dies geschieht, um auch den Widerstand gegenüber einer möglichen schädigenden Thaumasitbildung zu prüfen, die bekanntermaßen bevorzugt bei einer niedrigen Umgebungstemperatur abläuft. Insbesondere bei solch niedrigen Temperaturen ergaben die Schnellprüfverfahren des Öfteren nicht die erwarteten positiven Prüfergebnisse für normkonforme Gemische aus Zement und Steinkohlenflugasche. Für die Diskrepanz zwischen den Laborbeobachtungen und den Erfahrungen aus der Baupraxis, wonach für Betone mit hohem Sulfatwiderstand bisher keine Schäden bekannt wurden, sind vermutlich zwei Faktoren verantwortlich: Zum einen ist dies eine unzureichende physikalische Gefügedichtigkeit aufgrund einer hohen Anfangsporosität. Zum anderen kann die mehrfach höhere Sulfatkonzentration im Labor zu veränderten Reaktionsverläufen führen.

### Praxisnahe Prüfbedingungen

Seit nunmehr rund fünf Jahren werden im Forschungsinstitut neben den Sulfatwiderstandsprüfungen mit Schnellprüfverfahren auch Prüfungen unter praxisnahen Bedingungen durchgeführt. Im Wesentlichen gibt es hierbei drei Unterschiede zu den traditionellen Schnellprüfverfahren. Zum einen ist die Sulfatkonzentration des angreifenden Mediums auf 3000 mg/l bzw. sogar nur 1500 mg/l begrenzt. Dies entspricht der in der DIN 1045-2 festgelegten Grenze für die Angriffsklasse XA2 und der Einsatzgrenze für Zement-Flugasche-Gemische. Zum anderen ist der Wasserzementwert auf 0,50 begrenzt. Des Weiteren finden die Prüfungen bei einer niedrigen Umgebungstemperatur von  $8^\circ\text{C}$  statt. Nach einer üblichen 14-tägigen Vorlagerung bei  $20^\circ\text{C}$  werden



Bild III-27: Mörtelflachprisma aus HS-Portlandzement (CEM I 32,5 R-HS) nach 24 Monaten Lagerung in Natriumsulfatlösung (1500 mg SO<sub>4</sub>/l) bei 8 °C.

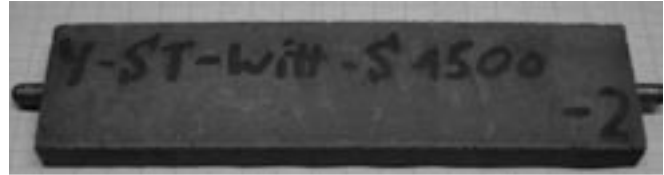


Bild III-28: Mörtelflachprisma aus HS-Hochofenzement (CEM III/B 32,5 R-LH/HS) nach 24 Monaten Lagerung in Natriumsulfatlösung (1500 mg SO<sub>4</sub>/l) bei 8 °C.



Bild III-29: Mörtelflachprisma aus Portlandzement (CEM I 32,5 R) mit 5 M.-% Kalksteinmehl als Nebenbestandteil nach 24 Monaten Lagerung in Natriumsulfatlösung (1500 mg SO<sub>4</sub>/l) bei 8 °C

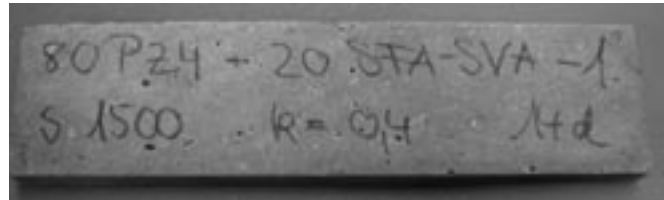


Bild III-30: Mörtelflachprisma aus einem Gemisch mit 80 M.-% CEM I 32,5 R und 20 M.-% SFA (k = 0,4) nach 24 Monaten Lagerung in Natriumsulfatlösung (1500 mg SO<sub>4</sub>/l) bei 8 °C



Bild III-31: Mörtelflachprisma aus einem Gemisch mit 80 M.-% CEM II/A-LL 32,5 R und 20 M.-% SFA (k = 0,4) nach 24 Monaten Lagerung in Natriumsulfatlösung (1500 mg SO<sub>4</sub>/l) bei 8 °C

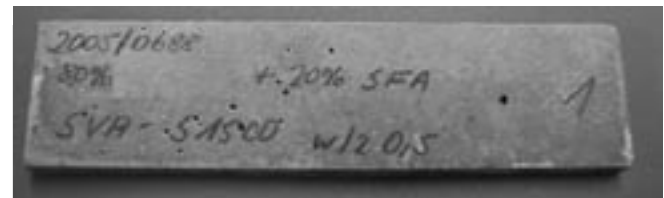


Bild III-32: Mörtelflachprisma aus einem Gemisch mit 80 M.-% CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R und 20 M.-% SFA (k = 0,4) nach 13 Monaten Lagerung in Natriumsulfatlösung (1500 mg SO<sub>4</sub>/l) bei 8 °C

die Mörtelprüfkörper danach über einen Zeitraum von mindestens sechs bzw. zwölf Monaten in der Prüflösung gelagert.

#### Flugaschefreie Prüfmörtel

Mit dem praxisnahen Prüfverfahren soll eine sichere und klare Differenzierung zwischen bekanntermaßen sulfatbeständigen und nicht sulfatbeständigen Mörteln möglich sein. Um dieses zu überprüfen, wurden Mörtel auf der Basis von HS-Zementen und verschiedenen aluminatreichen Portland- und Portlandkalksteinzementen hergestellt und untersucht. Bild III-27 und Bild III-28 zeigen Mörtelflachprismen aus HS-Portlandzement und HS-Hochofenzement nach einer Lagerdauer von zwei Jahren. Die Prüfkörper sind vollständig intakt. Weder an den Ecken noch an den Kanten sind Rissbildungen oder Abplatzungen vorhanden. Bei Mörtelflachprismen auf der Basis von Portlandkalksteinzement und aluminatreichen gewöhnlichen Portlandzementen ist das Erscheinungsbild hingegen anders. Bild III-29 zeigt

exemplarisch ein Mörtelflachprisma aus einem gewöhnlichen Portlandzement, der 5 M.-% Kalksteinmehl als Nebenbestandteil enthält. Das Mörtelgefüge ist deutlich geschädigt. Ecken und Kanten sind entfestigt. Vorrangig ist dies auf die Bildung von Thaumasit zurückzuführen, welches als weißes Reaktionsprodukt erkennbar ist. Der Nachweis von Thaumasit erfolgt mittels Röntgendiffraktometrie und Rasterelektronenmikroskopie.

#### Flugaschehaltige Prüfmörtel

Die Bilder III-30 bis III-32 zeigen die Prüfmörtel auf Basis von 80 M.-% Zement und 20 M.-% Steinkohlenflugasche. Der äquivalente Wasserzementwert beträgt 0,50 und der Anrechnungsfaktor der Flugasche an den Wasserzementwert  $f = 0,4$ . In allen drei Fällen sind die Prüfkörper nach einer Versuchsdauer von zwei Jahren intakt. Weder Treiberscheinungen noch eine oberflächliche Thaumasitbildung wurden festgestellt. Portlandkompositzemente dürfen genauso wie Portlandzemente und

Portlandkalksteinzemente im Gemisch mit Flugasche bei einem Sulfatangriff bis 1500 mg SO<sub>4</sub>/l zur Betonherstellung verwendet werden. Bei der im Forschungsinstitut erstmalig durchgeführten Sulfatwiderstandsprüfung von Portlandkompositzementen wurden zwei Zemente des gebräuchlichsten Typs CEM II/B-M (S-LL) untersucht. Der hohe Sulfatwiderstand der Gemische zeigte sich nicht nur bei der Prüfung mit 1500 mg SO<sub>4</sub>/l, sondern auch bei einer Sulfatkonzentration von 3000 mg SO<sub>4</sub>/l. Bisher liegen für die Portlandkompositzemente Untersuchungsergebnisse bis zu einer Expositionszeit von gut einem Jahr vor. Die Untersuchungen werden während der nächsten Jahre weitergeführt.

# IV

## Güteüberwachung und Qualitätssicherung von Zement

Güteüberwachung und Qualitätssicherung von Zement gehören zu den traditionellen Aufgaben der Überwachungsgemeinschaft des VDZ. Schon vor mehr als 100 Jahren begann man – seinerzeit in der Vorgängerorganisation – mit regelmäßigen Fremdüberwachungsprüfungen des Baustoffs Zement. Die Initiative ging damals von den Zementherstellern selber aus. Erst wesentlich später hat die Bauaufsicht diesen Gedanken aufgegriffen und verpflichtende Vorgaben für die Produktüberwachung gemacht.

Insbesondere durch kontinuierliche Umstellung auf europäische Regelwerke hat sich das Erscheinungsbild der Überwachungsgemeinschaft in den letzten zehn bis 15 Jahren verändert. Seit rund fünf Jahren besitzt die europäische Zementnorm Gültigkeit. CE-zertifizierte Produkte können in ganz Europa frei gehandelt werden. Nunmehr rücken Fragen der Vergleichbarkeit des Konformitätsnachweises auf europäischer Ebene wesentlich stärker in den Vordergrund des Interesses. In diesem Zusammenhang hat nicht nur die europäische Anerkennung durch die EU-Kommission nach Bauproduktenrichtlinie, sondern auch die privatrechtliche Akkreditierung als Kompetenznachweis und vertrauensbildende Maßnahme an Bedeutung gewonnen. Durch die Überarbeitung des Neuen Ansatzes (New Approach) werden sich hier zukünftig Änderungen ergeben. Die Überwachungsgemeinschaft hat sich frühzeitig auf diese Entwicklung eingestellt und zusätzlich zur gesetzlichen Anerkennung privatrechtlich akkreditieren lassen.

Die Anzahl der zertifizierten und überwachten Bindemittel hat sich im Berichtszeitraum kaum verändert. Ohne Berücksichtigung von Mehrfachzertifikaten für identische Bindemittel wurden im Jahr 2007 rund 528 Bindemittel aus 62 Werken nach gesetzlichen Regelwerken überwacht. Die Anzahl der Bindemittel, die aufgrund von bestehenden Vereinbarungen mit ausländischen Stellen zusätzlich nach privatrechtlichen Regelwerken überwacht werden, hat nochmals geringfügig zugenommen. Darüber hinaus wurden Prüfungen u. a. an Pigmenten, Flugaschen und Einpressmörteln durchgeführt. Im Berichtszeitraum wurden die Anerkennungsbereiche geringfügig ergänzt.

Die Aktivitäten im Bereich der Zementnormung wurden unter Beteiligung von Mitarbeitern des Forschungsinstituts konsequent weitergeführt. Weitere Produkt- und Prüfnormen insbesondere für Spezialzemente und Sonderbindemittel sind hinzugekommen. Im Berichtszeitraum wurde u. a. das CEN-Umfrageverfahren für Normenänderungen für Zemente mit hohem Sulfatwiderstand durchgeführt. Auch wurde die Überarbeitung der beiden Basisnormen – der Produktnorm EN 197-1 sowie der Überwachungsnorm EN 197-2 – inzwischen eingeleitet. Die Überwachungsnorm EN 197-2 und die zugehörigen Leitlinien bilden inzwischen auch die Vorlage für entsprechende Überwachungsregeln für Zusatzstoffe. Auch wurden auf der Ebene der notifizierten Stellen entsprechende Auslegungen zu den Überwachungsregelungen erstellt und freigegeben. Im Berichtszeitraum wurden auch die Prüfverfahren für Zement weiterentwickelt. Eine besonders intensive Betreuung erforderten die Arbeiten an dem europäischen Chromatprüfverfahren.



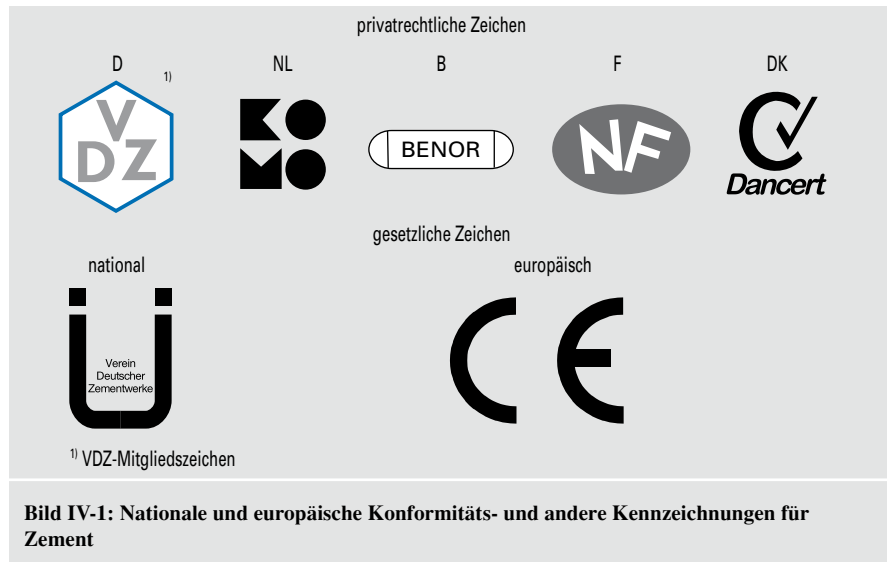
## Überwachungsgemeinschaft des VDZ ■

Die Prüfung, Überwachung und Zertifizierung von Zement und zementartigen Bindemitteln zur Erfüllung der Schutzziele der Landesbauordnungen bzw. im Sinne des Bauproduktengesetzes gehört zu den satzungsgemäßen Aufgaben des VDZ. Zu diesem Zweck unterhält der Verein die Überwachungsgemeinschaft als Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle (PÜZ-Stelle). Die Ergebnisse der Fremdüberwachung werden im Fachausschuss der Überwachungsgemeinschaft des VDZ zweimal jährlich beraten.

Seit rund fünf Jahren werden Zemente entsprechend der europäischen Zementnorm EN 197-1 zertifiziert. Diese Zemente erhalten das CE-Zeichen und können in allen Ländern des europäischen Wirtschaftsraums frei gehandelt werden. Inzwischen gelten für weitere von der Überwachungsgemeinschaft des VDZ überwachte Bauprodukte, wie z. B. Putz- und Mauerbinder, europäische Regelwerke. Grundsätzlich erfüllen auch alle Zemente mit besonderen Eigenschaften nach DIN 1164-10 die Anforderungen der europäischen Zementnorm EN 197-1. Dementsprechend betreffen inzwischen mehr als 90 % der Tätigkeit der Überwachungsgemeinschaft des VDZ europäische Regelwerke. Fragen der Vergleichbarkeit der Konformitätsbewertungen auf europäischer Ebene rücken damit zunehmend in den Vordergrund des Interesses.

### 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). Im Geltungsbereich der Landesbauordnungen wird das nationale Ü-Zeichen als Übereinstimmungszeichen verwendet (**Bild IV-1**). 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. Im Geltungsbereich der Bauproduktenrichtlinie wird die CE-Kennzeichnung als Konformitätszeichen verwendet. Darüber hinaus bestehen bilaterale Vereinbarungen mit ausländischen Stellen. Zum Nachweis der Konformität werden entsprechende privatrechtliche Zeichen verwendet (**Bild IV-1**).



**Bild IV-1: Nationale und europäische Konformitäts- und andere Kennzeichnungen für Zement**

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

Bauprodukte	Technische Regel(n)	Konformitäts-Nachweisstufe	
		BPG	LBO
<b>Bindemittel</b>			
Normalzement	EN 197-1	1+	
Zement mit besonderen Eigenschaften	EN 197-4 EN 14216 DIN 1164-10, -11, -12	1+ 1+ 1+	ÜZ
Tonerdezement	EN 14647	1+	
Putz- und Mauerbinder	EN 413-1	1+	
Hydraulischer Tragschichtbinder	DIN 18506		(ÜZ) <sup>1)</sup>
Baukalk	EN 459-1	2	
Sonstige zementartige Bindemittel (inkl. Spritzbetonzemente)	Zulassung <sup>2)</sup>		ÜZ
<b>Betonzusatzstoffe</b>			
Pigmente	EN 12878	2+	
Flugasche	EN 450-1	1+	
Silicastaub	EN 13263-1	1+	
Natürliche Puzzolane (Trass)	DIN 51043		ÜZ
Sonstige Betonzusatzstoffe	Zulassung <sup>2)</sup>		ÜZ
<b>Betonzusatzmittel</b>			
	EN 934-2, -3, -4 DIN V 18998 Zulassung <sup>2)</sup>	2+	ÜHP ÜZ
<b>Gesteinskörnungen</b>			
	EN 12620 EN 13055-1 EN 13139	2+ 2+ 2+	
<b>Mörtel im Mauerwerksbau</b>			
	EN 998-2	2+	
<b>Einpressmörtel</b>			
	EN 447		ÜZ

BPG: Bauproduktengesetz

LBO: Landesbauordnungen

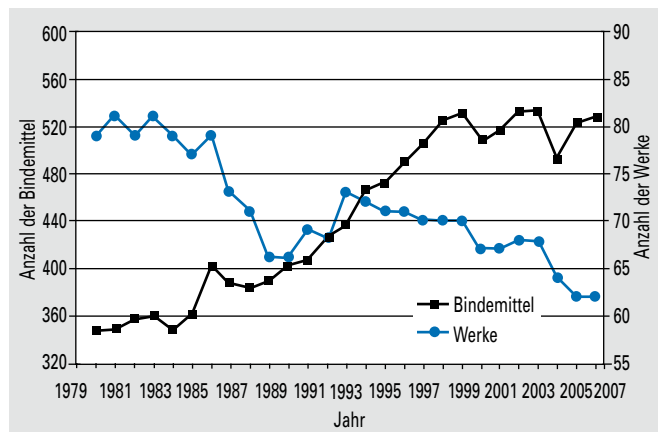
<sup>1)</sup> bauaufsichtlich nicht relevant, Nachweisstufe entspricht ÜZ

<sup>2)</sup> bei wesentlichen Abweichungen hinsichtlich Herstellverfahren, Zusammensetzung und Eigenschaften von Norm

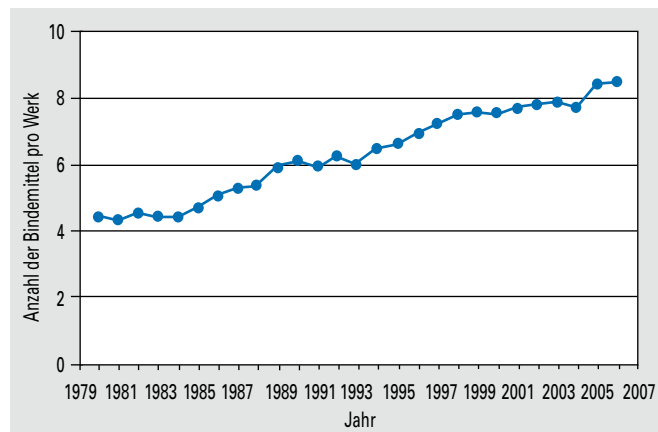
**Tafel IV-2: Übersicht über die von der Überwachungsgemeinschaft des VDZ im Jahr 2006 zertifizierten bzw. überwachten Zemente und hydraulischen Bindemittel**

Bindemittel	Norm/Regelwerk	Geltungsbereich	Art der Zertifizierung	Zertifizierungsstelle	Überwachungsstelle	Anzahl Bindemittel	Anzahl Werke
Zement	EN 197-1	EU	gesetzlich	VDZ	VDZ	561 <sup>1)</sup>	62
	DIN 1164	Deutschland					
	Zulassung	Deutschland					
	DIN 1164	Deutschland					
	ZTV Beton	Deutschland	privatrechtlich	-	VDZ	57	34
	BRL 2601, NEN 3550	Niederlande		bmc	VDZ	108	30
	TRA 600, PTV 603, NBN B 12	Belgien		VDZ	VDZ	34	13
	Reglement NF	Frankreich		AFNOR	VDZ	24	10
Putz- und Mauerbinder	EN 413	Deutschland	gesetzlich	VDZ	VDZ	22	18
	BRL 2603	Niederlande	privatrechtlich	bmc	VDZ	4	3
hydraulischer Tragschichtbinder	DIN 18506	Deutschland	(gesetzlich)	VDZ	VDZ	13	12

<sup>1)</sup> In diesen Zahlen sind insgesamt 68 Mehrfachzertifikate für identische Zemente sowie 20 bauaufsichtlich zugelassene Zemente enthalten.



**Bild IV-2: Entwicklung der von der Überwachungsgemeinschaft des VDZ fremdüberwachten Bindemittel und Werke**



**Bild IV-3: Mittlere Anzahl überwachter Bindemittel pro Werk für die von der Überwachungsgemeinschaft des VDZ überwachten Werke**

Über die Forderungen aus dem gesetzlich geregelten Bereich hinaus ist die Überwachungsgemeinschaft des VDZ seit 2002 privatrechtlich als Produktzertifizierer nach EN 45011 akkreditiert. Zusätzlich wurden alle relevanten Laborprüfungen nach ISO 17025 akkreditiert. Im Rahmen der Akkreditierung wird die Überwachungsgemeinschaft regelmäßig extern begutachtet (siehe Kapitel VDZ/FIZ).

Die Anerkennung der Überwachungsgemeinschaft des VDZ durch die zuständigen Bauaufsichtsbehörden erstreckt sich insbesondere auf Zemente und zementartige Bindemittel. Weiterhin gilt die Anerkennung für Betonzusatzstoffe und -mittel sowie zementhaltige Zubereitungen. Sie bezieht sich sowohl auf genormte als auch auf bauaufsichtlich zugelassene Produkte

(Tafel IV-1). Um das Dienstleistungsangebot möglichst attraktiv zu gestalten, werden die Anerkennungsgebiete ständig aktualisiert. Auch im Berichtszeitraum wurde ein Antrag auf Ergänzung für Tonerdezement nach EN 14647, Flugasche nach EN 450, Silicastaub nach EN 13263 und Pigmente nach EN 12878 gestellt.

**Fremdüberwachung von Zement nach gesetzlichen Regelwerken**

Tafel IV-2 enthält eine Übersicht über die von der Überwachungsgemeinschaft des VDZ im Jahr 2006 zertifizierten bzw. überwachten Zemente und hydraulischen Bindemittel. 596 Bindemittel wurden nach gesetzlichen Regelwerken zertifiziert bzw. überwacht. Das betraf insbesondere 561 (94 %) Zemente. In den Zahlen sind neun Zemente aus sechs ausländischen Werken

enthalten. In 68 von 561 Fällen wurden Mehrfachzertifikate für identische Zemente ausgestellt, die sowohl EG-Konformitätszertifikate (EN 197-1) als auch Übereinstimmungszertifikate (DIN 1164-10) erhalten haben. In einem Fall wurde durch die Überwachungsgemeinschaft des VDZ ein Übereinstimmungszertifikat nach DIN 1164 für einen Zement erteilt, der durch eine ausländische Stelle überwacht wird.

Ohne die Mehrfachzertifikate für identische Zemente ergibt sich für das Jahr 2006 eine Anzahl von 528 fremdüberwachten Bindemitteln aus 62 Werken. Damit ist die Anzahl der überwachten Bindemittel in den letzten acht Jahren weitgehend konstant geblieben (Bild IV-2). Die mittlere Anzahl der überwachten Bindemittel pro

Tafel IV-3: Anzahl der von der Überwachungsgemeinschaft des VDZ im Jahr 2006 (2004) überwachten 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	51 (59)	80 (81)	56 (54)	187 (194)	12,3 (23,0)	21,5 (28,3)	8,3 (7,3)	42,1 (58,6)
Portlandkompositzement CEM II	79 (80)	60 (41)	31 (14)	170 (135)	24,0 (22,1)	12,4 (7,5)	3,6 (1,4)	40,0 (31,0)
Hochofenzement CEM III	72 (75)	44 (30)	7 (6)	123 (111)	9,9 (8,3)	7,5 (1,9)	0,5 (0,2)	17,9 (10,4)
Puzzolanzement CEM IV	3 (2)	- (-)	- (-)	3 (2)	0,0 (0,0)	- (-)	- (-)	0,0 (0,0)
Kompositzement CEM V	- (-)	- (-)	1 (1)	1 (1)	- (-)	- (-)	0,0 (0,0)	0,0 (0,0)
Summe	205 (216)	184 (152)	95 (75)	484 (443)	46,2 (53,4)	41,4 (37,7)	12,4 (8,9)	100,0 (100,0)
Zemente mit hoher Anfangsfestigkeit (R)	124 (132)	102 (97)	50 (45)	276 (274)	37,0 (44,7)	27,6 (30,9)	8,5 (7,4)	73,1 (83,0)
Zemente mit üblicher Anfangsfestigkeit (N)	81 (84)	82 (55)	45 (30)	208 (169)	9,2 (8,7)	13,8 (6,8)	3,9 (1,5)	26,9 (17,0)
Zemente mit Sondereigenschaften (LH, HS, NA)	60 (65)	45 (33)	6 (5)	111 (103)	keine Angaben			

Werk steigt seit rund 20 Jahren und liegt derzeit bei etwa 8,5 Bindemitteln pro Werk (**Bild IV-3**).

Für die von der Überwachungsgemeinschaft des VDZ überwachten inländischen Zemente sind in **Tafel IV-3** die Anzahl der Zertifikate (ebenfalls ohne Mehrfachzertifikate für identische Zemente) und die zugehörigen inländischen Versandmengen des Jahres 2006 im Vergleich zu 2004 (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 überwachten inländischen Zemente seit 2004 um 41 auf 484 zugenommen hat. Die Zunahme erfolgte hauptsächlich im Bereich der Portlandkompositzemente der Festigkeitsklassen 42,5 und 52,5 bzw. der Hochofenzemente der Festigkeitsklasse 42,5. Auffällig ist, dass der Zuwachs ausschließlich im Bereich der Zemente mit üblicher Anfangsfestigkeit (N) erfolgte.

Ebenfalls war eine signifikante Zunahme der Versandmengen von hüttensandhaltigen Portlandkompositzementen CEM II und Hochofenzementen CEM III zu erkennen. Gleichzeitig nahmen die Versandmengenanteile von Portlandzementen CEM I der Festigkeitsklassen 32,5 und 42,5 ab. Auffällig war eine deutliche Verschiebung der Versandmengenanteile von Zementen der Festigkeitsklasse 32,5 R hin zu Zementen der Festigkeitsklasse 42,5 N.

Im Jahr 2006 wurden auch 57 Zemente mit Verwendungsgenehmigung für Betonfahrbahnen überwacht. Weiterhin überwachte die Überwachungsgemeinschaft des VDZ in 2006 noch 22 Putz- und Mauerbinder nach EN 413-1 – davon entfielen vier auf die Klasse MC 12,5 – sowie 13 hydraulische Boden- und Tragschichtbinder nach DIN 18506.

**Bild IV-4** bestätigt, dass sich in den letzten Jahren eine deutliche Verschiebung im Inlandversand der Zemente ergeben hat. Gegenübergestellt sind die Anteile der Zementarten und Festigkeitsklassen am Inlandsversand in den Jahren 2000 und 2006. Zum einen ist zu beobachten, dass der Anteil der Zemente der Festigkeitsklasse 32,5 in den letzten sechs Jahren von 60,1 % auf 46,2 % zurückgegangen ist und gleichzeitig die Zemente der oberen Festigkeitsklassen entsprechend zugelegt haben. Inzwischen wird annähernd genausoviel Zement der Festigkeitsklasse 42,5 wie solcher der Festigkeitsklasse 32,5 hergestellt.

Gleichzeitig ergibt sich eine ähnliche Verschiebung bei den Zementarten. Im Zuge der verstärkten Bemühungen zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung und Verwendung von Hüttensand als Zementbestandteil hat sich der Versandmengenanteil der Portlandzemente in den letzten 20 Jahren nahezu halbiert. Seit 2000 hat der Anteil um knapp 20 % von 61,7 % auf 42,1 % abgenommen. Gleichzeitig hat sich der Anteil der CEM II-Zemente in gleichem Maße erhöht. Dies ist besonders augenfällig bei den Zementen

der Festigkeitsklasse 32,5. Hier entfallen inzwischen mehr als die Hälfte der Zemente auf CEM II-Zemente. Im Berichtszeitraum hat sich der Anteil der CEM III-Zemente geringfügig verringert.

#### 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 (**Bild IV-1**). Die Überwachungsgemeinschaft des VDZ führt in Absprache mit der entsprechenden ausländischen Stelle bei deutschen Herstellern die erforderlichen ergänzenden Prüfungen und Überwachungen durch. Dadurch lässt sich der Zusatzaufwand für die Zementhersteller reduzieren.

Derzeit werden von der Überwachungsgemeinschaft des VDZ 108 Zemente und vier Putz- und Mauerbinder aus 30 Werken zusätzlich nach niederländischen Beurteilungskriterien (BRL) überwacht und die Zertifikate durch BMC ausgestellt (**Tafel VI-2**).

Weiterhin zertifiziert und überwacht die Überwachungsgemeinschaft des VDZ derzeit 34 Zemente aus 13 Werken zusätz-



lich nach belgischen Regelwerken, die zur Führung des belgischen BENOR-Zeichens berechtigen. Im Berichtszeitraum ergaben sich einige Anpassungen der belgischen Regelwerke, u. a. wurden die Vorgaben bei Klinkerwechsel präzisiert.

In Frankreich besteht ein Reglement für die Vergabe des NF-Zeichens. Mit der französischen Zertifizierungsstelle AFNOR gilt die Vereinbarung, dass die Überwachungsgemeinschaft des VDZ im Unterauftrag von AFNOR die Fremdüberwachungsprüfungen und die Werksbesuche in deutschen Zementwerken durchführt. Die Überwachungsgemeinschaft prüft und überwacht derzeit 24 Zemente mit NF-Zeichen aus zehn Herstellwerken.

Im Berichtszeitraum wurden auch mit der dänischen Stelle DanCert in Einzelfällen Vereinbarungen über die Anerkennung von Überwachungsergebnissen getroffen. Dies betraf vor allem die Überwachung des Chromatgehalts nach EN 196-10.

**Weitere Bauprodukte**

Nachdem die neue Pigmentnorm DIN EN 12878 im Jahr 2006 bauaufsichtlich eingeführt wurde, zertifiziert und überwacht die Überwachungsgemeinschaft des VDZ auch die werkseigene Produktionskontrolle von Pigmentherstellern. Im Berichtszeitraum betraf das die Herstellung von 37 verschiedenen Pigmenten in der Bundesrepublik Deutschland. Außerdem wurden 54 Pigmentproben im Güteüberwachungslabor geprüft.

Mit Einführung der neuen Mauermörtelnorm DIN EN 998-2 kann auch für

Mauermörtelhersteller ein CE-Zeichen vergeben werden. Dazu muss die werkseigene Produktionskontrolle (Konformitätsnachweis 2+) von Mauermörtelherstellern durch notifizierte Stellen anerkannt und überwacht werden. Eine Anleitung zur werkseigenen Produktionskontrolle für die CE-Kennzeichnung von Mauermörteln nach Eignungsprüfung wird in der neuen DIN 18581 gegeben. Mitarbeiter des Forschungsinstituts waren auch bei der Erstellung dieser Norm beteiligt. Die Einführung der DIN 18581 wird im Jahr 2008 erfolgen.

Mit der Baustellenüberwachung der Verpressarbeiten von Einpressmörtel wurde im November 2006 begonnen. Außerdem wurden im Berichtszeitraum verschiedene Auftragsprüfungen für Einpressmörtel nach DIN EN 447 durchgeführt.

**Vergleichsprüfungen**

Zur Gewährleistung eines konstanten Prüfniveaus sowie zur Erfüllung der entsprechenden Forderungen aus Normen bzw. der Akkreditierung nimmt die Prüfstelle der Überwachungsgemeinschaft des VDZ regelmäßig an mehreren Ringversuchen teil. Insbesondere die Standardprüfungen für Zement werden mehrmals pro Jahr national und international verglichen.

Beispielsweise werden von der Stichting BMC wöchentliche Vergleichsprüfungen mit einem niederländischen Referenzzement organisiert, die vierteljährlich ausgewertet werden. In einem jährlich stattfindenden Treffen der Vertreter der teilnehmenden Fremdüberwachungsinstitutionen werden die Ergebnisse diskutiert. Gleich-

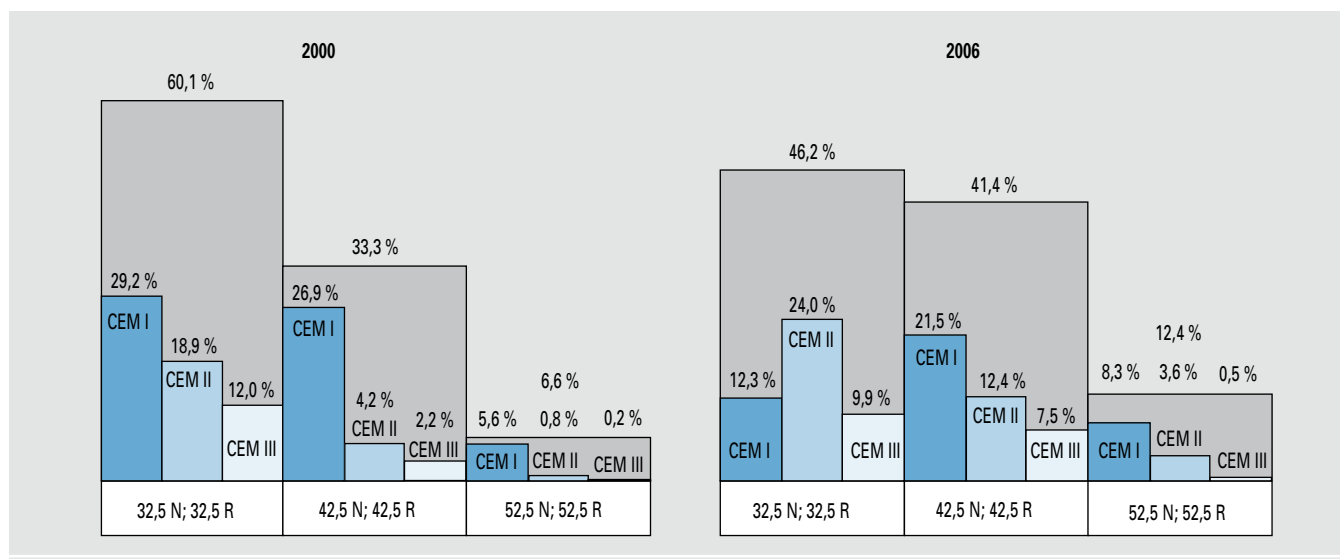
zeitig werden die Resultate der wöchentlichen Prüfung des Referenzzements in einer Qualitätsregelkarte dokumentiert, um Schwankungen festzustellen und schnell darauf reagieren zu können.

Darüber hinaus nimmt das Forschungsinstitut an der jährlich durchgeführten Zement-Vergleichsprüfung der Association Technique de L'Industrie des Liants Hydrauliques (ATILH) teil, an der sich regelmäßig etwa 200 Prüflaboratorien aus derzeit 59 Ländern beteiligen. Ähnliche nationale Ringversuche wurden an anderen Baustoffen, wie z. B. mit Flugasche und Betonzusatzmittel, durchgeführt.

Auch bei der Überarbeitung von Prüfnormen werden in den Normenausschüssen vielfach Ringversuche organisiert, an denen der VDZ teilnimmt (vgl. den nachfolgenden Abschnitt Prüfverfahren). Dadurch sollen die Verfahren erprobt, mögliche Schwachstellen aufgedeckt und statistische Daten über die Wiederhol- und Vergleichbarkeit der Verfahren abgeleitet werden.

**Prüflabor**

Im Zusammenhang mit Fremdüberwachungsprüfungen sowie zugehörigen Auftrags- und Vergleichsprüfungen werden jährlich etwa 3 500 Bindemittelproben in den Laboren des Forschungsinstituts geprüft. Bei im Mittel etwa zehn zu prüfenden Eigenschaften entspricht das rund 35 000 Einzelprüfungen. Bei diesem hohen Probendurchsatz sind einerseits rationelle Prüfabläufe unerlässlich, andererseits muss ein konstantes Prüfniveau und eine hohe Prüfqualität sichergestellt werden. Dies wird durch eine hohe Vereinheitlichung



**Bild IV-4: Gegenüberstellung der Anteile der Zementarten und Festigkeitsklassen am Inlandsversand der in Deutschland hergestellten Zemente in den Jahren 2000 und 2006**



Bild IV-5: Blick in das Güteüberwachungslabor

Bei der Überarbeitung des Neuen Ansatzes wurde auf die Module für die Konformitätsbewertung, auf Akkreditierung, Marktüberwachung und CE-Kennzeichnung eingegangen. Die Entwicklung im Bereich Konformitätsbewertung und Akkreditierung soll nachfolgend kurz behandelt werden.

**Konformitätsbewertung**

Das Konformitätsbewertungsverfahren wird durch die EU-Kommission für den jeweiligen Baustoff festgelegt und durch CEN in der zugehörigen harmonisierten Norm ausgestaltet. In der Bauproduktenrichtlinie sind vier Systeme der Konformitätsbescheinigung vorgegeben (Tafel IV-4). Diese vier Systeme stimmen nicht vollständig mit den im Neuen Ansatz vorgesehenen Modulen für die Konformitätsbewertung überein, lassen sich aber von diesen ableiten. Ob sich hier bei Überarbeitung der Bauproduktenrichtlinie Änderungen ergeben werden, kann derzeit noch nicht gesagt werden.

Tafel IV-4: Systeme der Konformitätsbescheinigung nach Bauproduktenrichtlinie und zugehörige Elemente der Konformitätskontrolle

	Elemente der Konformitätskontrolle	Systeme nach Bauproduktenrichtlinie					
		1+	1	2+	2	3	4
Hersteller	Erstprüfung des Produkts						
	Prüfung von im Werk entnommenen Proben nach festgelegtem Prüfplan						
	Werkseigene Produktionskontrolle						
zugelassene Stelle	Erstprüfung des Produkts						
	Stichprobenprüfung (Fremdüberwachungsprüfung) von im Werk entnommenen Proben						
	Erstüberwachung des Werks und der werkseigenen Produktionskontrolle						
	Laufende Überwachung, Beurteilung und Anerkennung der werkseigenen Produktionskontrolle						
		Zertifizierung			Herstellereklärung		

der Prüfabläufe erzielt. Die physikalischen Prüfungen werden im Güteüberwachungslabor (Bild IV-5), die chemischen Prüfungen im Unterauftrag durch die Abteilung Zementchemie durchgeführt. Im Berichtszeitraum wurden die Hydrationswärmebestimmungen entsprechend der europäischen Norm für LH-Zemente von bisher zweimal auf sechsmal pro Jahr erhöht und die Prüfabläufe auf die Neufassung der EN 196 umgestellt.

**Qualitätssicherung ■**

Die EU-Bauproduktenrichtlinie ist eine von insgesamt 25 Richtlinien nach dem so genannten „Neuen Ansatz“ (New Approach). Der Neue Ansatz wurde 1985 verabschiedet. Hierbei handelt es sich um ein vereinfachendes Rechtsinstrument zum Zwecke der Schaffung eines einheitlichen europäischen Binnenmarkts. Aufgrund einer vor rund drei Jahren eingeleiteten Über-

arbeitung des Neuen Ansatzes wurden im Berichtszeitraum erste Kommissionsvorschläge für eine Überarbeitung vorgelegt. In mehreren Informationsveranstaltungen wurden die betroffenen Kreise über die bevorstehenden Änderungen unterrichtet.

In einem nächsten Schritt soll die EU-Bauproduktenrichtlinie angepasst und überarbeitet werden. Nach Auffassung der EU-Kommission werden durch die Bauproduktenrichtlinie Handelsschranken nur teilweise beseitigt. Vor allem wäre die Bauproduktenrichtlinie zu komplex und mehrdeutig in ihren Aussagen. Im Berichtszeitraum hat die EU-Kommission in zwei Umfragen Vorschläge für die Überarbeitung der Bauproduktenrichtlinie gesammelt. Einige Länder versuchen deshalb, auf eine Vereinfachung und Deregulierung hinzuwirken. Bestimmte Änderungen werden sich vermutlich aus der Änderung des Neuen Ansatzes ergeben.

Allen Systemen der Konformitätsbewertung ist gemeinsam, dass der Hersteller unter seiner Verantwortung eine werks-eigene Produktionskontrolle betreiben muss. Die jeweiligen Normen legen die erforderlichen Nachweise des Herstellers einschließlich durchzuführender Prüfungen mit Prüfhäufigkeiten und -verfahren fest. Der Umfang der im Rahmen der werks-eigenen Produktionskontrolle durchzuführenden Prüfungen hat sich bei vielen Baustoffen mit Einführung von harmonisierten Normen erhöht. Der Unterschied zwischen den vier Systemen der Konformitätsbescheinigung besteht in dem Grad der Einbindung einer unabhängigen externen Stelle in den Konformitätsnachweis.

Bei den meisten Bauprodukten muss der Hersteller eine Konformitätserklärung abgeben. Die anerkannte Stelle überwacht entweder die werkseigene Produktionskontrolle (System 2+) oder führt eine Erstprüfung des Produkts (System 3) durch. Bei System 4 ist keine Einbindung einer externen Stelle vorgesehen. Regelmäßige Fremdüberwachungsprüfungen werden nur im Falle einer Produktzertifizierung (System 1+) durchgeführt.

Nur bei wenigen Baustoffen wird eine Produktzertifizierung durch eine anerkannte Stelle gefordert. Hierzu gehören insbesondere wegen der Bedeutung für die Bausicherheit Zement und reaktive Betonzusatzstoffe. Im Berichtszeitraum wurden u. a. Überwachungsnormen für Flugasche, Silicastaub und Hüttensand erstellt und ver-

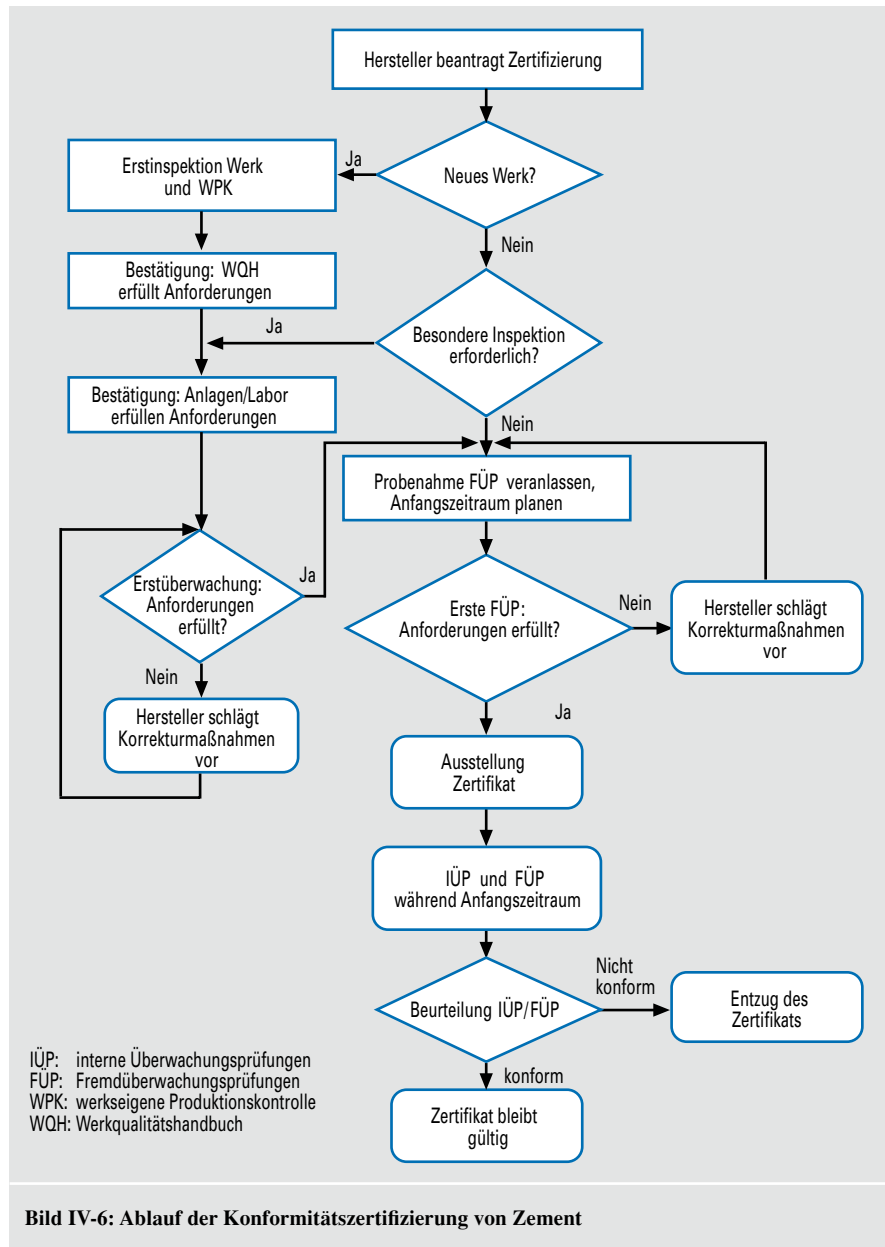
abschiedet. Für diese Produkte diente die Überwachungsnorm für Zement EN 197-2 als Vorlage.

Die inzwischen sechs Jahre alte Überwachungsnorm für Zement EN 197-2 wurde im Berichtszeitraum überarbeitet. Da die Erfahrungen mit dieser Norm sehr positiv sind, wurden hauptsächlich notwendige Klarstellungen vorgenommen. Durchgeführte Änderungen betrafen u. a. die Definition des Begriffs Werk, den Ablauf der Zertifizierung (**Bild IV-6**), die Vorgehensweise bei Nichtkonformität der werkseigenen Produktionskontrolle, die Anforderungen an Auslieferungsstellen, die Fremdüberwachungsprüfungen im Anfangszeitraum, die statistische Bewertung von Prüfergebnissen, Details von Probenahme und Prüfung sowie die Konformitätskennzeichnung. TC 51 legte fest, dass die Norm im Schnellverfahren (UAP) als europäische Norm verabschiedet wird und die ebenfalls bestehenden Leitlinien zu EN 197-2 überarbeitet werden.

### Akkreditierung und Anerkennung

Die Überarbeitung des Neuen Ansatzes hat weitgehende Konsequenzen für die Struktur des deutschen Akkreditierungswesens. Es wird gefordert, die Randbedingungen für anerkannte Stellen europäisch stärker zu vereinheitlichen. Derzeit sind in Deutschland rund 200 Stellen nach Bauproduktenrichtlinie anerkannt. Das sind wesentlich mehr Stellen als in den anderen Ländern der EU. Vor allem aus dem Ausland wird stärker gefordert, dass zukünftig eine privatrechtliche Akkreditierung als Mittel der Bewertung der Kompetenz von Stellen herangezogen wird. Dadurch sollen vergleichbare Bedingungen für alle Stellen in Europa geschaffen werden.

Im Jahr 2006 wurde eine umfassende Studie „Konformitätsbewertung in Deutschland“ vorgelegt, die im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft (BMWi) durchgeführt worden war. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass unter der Berücksichtigung der europäischen Entwicklungen Handlungsbedarf besteht, das derzeit in Deutschland bestehende Akkreditierungssystem zu überdenken. Es wurde vorgeschlagen, eine einzige deutsche Akkreditierungsstelle zu schaffen. Bis eine entsprechende europäische Verordnung vorliegt, wird vom BMWi ein Konzept als Übergangslösung vorgeschlagen. Aus diesem Grund wurde ein Deutscher Akkreditierungsbeirat gegründet, der das BMWi berät und unterstützt. Darin sind 21 stimmberechtigte Mitglieder der interessierten Kreise vertreten, darunter



**Bild IV-6: Ablauf der Konformitätszertifizierung von Zement**

auch ein Nukleus an Akkreditierungsstellen. Der Baubereich ist bisher kaum vertreten.

Die Suche nach einer einheitlichen Lösung wird vermutlich mehrere Jahre beanspruchen. Auch ist die zukünftige Struktur derzeit noch nicht zu erkennen. Vor allem die zukünftige Schnittstelle zwischen gesetzlich geregelter und nicht geregelter Bereich wird von Bedeutung sein.

### Zusammenarbeit der notifizierten Stellen

CE-gekennzeichnete Produkte dürfen in ganz Europa in Verkehr gebracht werden. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass alle notifizierten Stellen in Europa die Regelwerke gleichartig auslegen und nach vergleichbaren Bedingungen arbeiten. Nach dem Willen der EU-Kommission

müssen deshalb alle anerkannten Stellen in Europa an einem regelmäßigen Erfahrungsaustausch teilnehmen. Dieser Erfahrungsaustausch wird von den Stellen selber organisiert. Daher wurden auf europäischer Ebene verschiedene Gremien eingerichtet. Wegen der Vielzahl der Stellen in Deutschland bestehen zusätzlich nationale Spiegelgremien. Das Forschungsinstitut ist in den relevanten Gremien vertreten.

Bei den produktbezogenen Sektorgruppen arbeitet das Forschungsinstitut in der Sektorgruppe SG02 „Zement, Beton, Mörtel, Gesteinskörnungen“ mit. In SG 02 werden Positionspapiere zur Überwachung der Betonausgangsstoffe sowie von Mauer- und Reparaturmörteln erstellt. Im Berichtszeitraum betraf das u. a. Positionspapiere zur Überwachung von Zement, Flugasche, Silicastaub und Baukalk. Darüber hinaus



**Bild IV-7: Auditor von FIZ-Zert im Gespräch mit Werksmitarbeitern im Steinbruch eines Zementwerks**

### Zertifizierung von Managementsystemen

Unter dem Dach des Forschungsinstituts besteht auch eine Zertifizierungsstelle für Managementsysteme FIZ-Zert (vgl. Abschnitt VDZ/FIZ). Sie wurde 1996 eingerichtet, um Synergien mit der Produktzertifizierung nutzen zu können. Inzwischen werden nicht nur Qualitätsmanagementsysteme nach ISO 9001, sondern auch Umweltmanagementsysteme nach ISO 14001 zertifiziert. Hierfür ist FIZ-Zert durch die TGA (Trägeregemeinschaft für Akkreditierung) akkreditiert. **Bild IV-7** zeigt einen Auditor von FIZ-Zert im Gespräch mit Werksmitarbeitern im Steinbruch eines Zementwerks.

Seit 2004 verifiziert FIZ-Zert auch CO<sub>2</sub>-Emissionen gemäß Treibhaus-Emissionshandelsgesetz (TEHG). Mehrere Mitarbeiter des Forschungsinstituts sind entsprechend als Sachverständige öffentlich bestellt. Im Berichtszeitraum hat

FIZ-Zert CO<sub>2</sub>-Emissionen in insgesamt 28 Zementwerks- und zum Teil auch Kalkwerksstandorten mit insgesamt 44 Anlagen verifiziert (vgl. Abschnitt II).

### Normung ■

Früher waren in Deutschland alle Produktspezifikationen für Zement in einer einzigen deutschen Zementnorm DIN 1164 zusammengefasst. Im Jahr 2000 wurde die europäische Norm für Normalzemente EN 197-1 veröffentlicht. Darin wurden insgesamt 27 verschiedene Zementarten aufgenommen. Die Anforderungen für Normalzemente sind seitdem europäisch geregelt. Lediglich für Sonderzemente, die in der europäischen Norm nicht oder noch nicht berücksichtigt wurden, besteht in Deutschland eine Restnorm DIN 1164.

In den vergangenen fünf Jahren hat vor allem die Anzahl der bestehenden und vorgesehenen europäisch harmonisierten

besteht eine Advisory Group, in der die entsprechenden übergeordneten und horizontalen Papiere diskutiert und verabschiedet werden. Auch generelle Fragen, die die Zusammenarbeit mit anderen Organisationen betreffen, wie EU-Kommission, CEN, EOTA etc., werden hier beraten.

**Tafel IV-5: Bestehende und vorgesehene europäisch harmonisierte Produktnormen für Zement und andere hydraulische Bindemittel**

Norm-Nr.	Zement/Bindemittel	Zement-/Bindemittelart		Festigkeitsklasse	Zusätzliche Klassen	Stand
		Anzahl	Bezeichnung			
EN 197-1	Normalzemente	27	CEM I	32,5 N/R	-	2000, Revision inzwischen eingeleitet
A1	Normalzemente mit niedriger Hydratationswärme		CEM II	42,5 N/R	LH (≤ 270 J/g)	2004
prA2	Normalzement mit hohem Sulfatwiderstand		CEM III	52,5 N/R		
prA3	Flugasche als Zementbestandteil		CEM I CEM III/B u. /C CEM IV		SR 0, SR 3, SR 5 SR S SR P	2006, CEN-Umfrage abgeschlossen
EN 197-4	Hochofenzemente mit niedriger Anfangsfestigkeit	3	CEM III	32,5 L 42,5 L 52,5 L	LH (≤ 270 J/g)	2004
prA1	Hochofenzement mit hohem Sulfatwiderstand					2006, CEN-Umfrage abgeschlossen
EN 14216	Zemente mit sehr niedriger Hydratationswärme	6	VLH III/B u. /C VLH IV VLH V	22,5	VLH (≤ 220 J/g)	2004
EN 14647	Tonerdezement	1	CAC	40	-	2005
prENxxx	Sulfathüttenzement	1	CSS	30 40 50	-	Entwurfsvorschlag
prEN 13282-1 prEN 13282-2	Hydraulischer Tragschichtbinder	1 <sup>1)</sup>	HRB	N1 E2 N2 E3 N3 E4 N4	RS <sup>2)</sup>	Umwandlung ENV in EN
EN 413-1	Putz- und Mauerbinder	1	MC	5 12,5 22,5	X (ohne LP-Mittel)	2004
prEN 15368	Hydraulischer Binder für nicht-konstruktive Anwendungen	2	BHB	2,0 3,5	-	Fertig für formelle Abstimmung
EN 459-1	Baukalk	4	CL, DL, HL, NHL	2 3,5 5		2001, Revision inzwischen eingeleitet

<sup>1)</sup> Deklaration der Zusammensetzung in vorgegebenen Grenzen

<sup>2)</sup> RS = rapid setting (schnell erstarrend)

Produktnormen für Zemente und andere hydraulische Bindemittel zugenommen. **Tafel IV-5** gibt einen Überblick. Inzwischen bestehen insgesamt vier europäische Normen für Zement. Drei dieser Normen enthalten Festlegungen für Zemente mit niedriger Hydratationswärme LH und VLH. Im Berichtszeitraum ist eine Tonerdezementnorm hinzugekommen. Eine Norm für Sulfathüttenzement ist in Vorbereitung. Drei weitere Normen betreffen hydraulische Bindemittel, eine Baukalk. Zum Teil wurden bzw. werden die Normen inzwischen durch Änderungen erweitert (EN 197-1 und EN 197-4) oder neue Klassen aufgenommen (z. B. hydraulische Tragschichtbinder). Zemente und Bindemittel, die lediglich eine regionale Bedeutung haben, werden nun ebenfalls in die Normung einbezogen (z. B. hydraulische Binder für nicht-konstruktive Zwecke).

Unabhängig von der Erweiterung der Produktnormen hat sich in den vergangenen fünf Jahren bestätigt, dass mit der Basisnorm EN 197-1 zusammen mit der zugehörigen Konformitätsbewertungsnorm EN 197-2 (siehe vorheriger Abschnitt) und den zugehörigen Prüfnormen (siehe nachfolgender Abschnitt) eine vollständige Produktbeschreibung des Baustoffs Zement zur Verfügung steht. Dieses Normenpaket hat sich damit zweifellos bewährt.

Das Forschungsinstitut ist in fast allen Normungsausschüssen von CEN/TC 51 vertreten. Nachfolgend wird kurz über die Aktivitäten bei der Erweiterung und Überarbeitung der Basisnorm EN 197-1 berichtet.

**Zemente mit hohem Sulfatwiderstand**

Die EU-Kommission drängt seit vielen Jahren, die Festlegungen für Zemente mit hohem Sulfatwiderstand europäisch zu vereinheitlichen. Jahrelange Bestrebungen blieben bisher erfolglos. Dies ist u. a. darauf zurückzuführen, dass bislang kein allgemein gültiges Performance-Prüfverfahren für Zemente mit hohem Sulfatwiderstand vorliegt, das sich für die Erstellung einer performance-orientierten Produktnorm eignet. Im Rahmen der Jahressitzung des Europäischen Normenkomitees TC 51 im letzten Jahr in Dresden wurde ein CEN-Bericht vorgelegt und verabschiedet, der den Sachstand zusammenfasst.

Deshalb war die Suche nach einem europäischen Kompromiss auf der Grundlage von präskriptiven Kriterien fortgesetzt worden. Als Eingangsgröße diente ein Bericht über die in Europa genormten Zemente mit ho-

**Tafel IV-6: Die vorgesehenen sieben Produkte in der Familie der Normalzemente mit hohem Sulfatwiderstand**

Hauptbestandteile	Bezeichnung der Fünf Produkte (Arten von Normalzementen mit hohem Sulfatwiderstand)	Zusammensetzung in M.-%					Nebenbestandteile	
		Hauptbestandteile						
		Klinker K	Hütten-sand S	natür-liches Puzzolan P	kiesel-säure-reiche Flug- asche V			
CEM I	Portlandzement mit hohem Sulfatwiderstand	CEM I...-SR 0 CEM I...-SR 3 CEM I...-SR 5	95-100	-	-	-	0-5	
	CEM III	Hochofenzement mit hohem Sulfatwiderstand	CEM III/B...-SR S	20-34	66-80	-	-	0-5
		CEM III/C...-SR S	5-19	81-95	-	-	0-5	
CEM IV	Puzzolan-zement mit hohem Sulfatwiderstand	CEM IV/A...-SR P	65-80		← 20-35 →		0-5	
		CEM IV/B...-SR P	45-64		← 36-55 →		0-5	

**Tafel IV-7: Zusätzliche Anforderungen an Normalzemente mit hohem Sulfatwiderstand als charakteristischer Wert**

Eigenschaft	Prüfung nach	Zementart	Festigkeitsklasse	Anforderungen
Sulfatgehalt (als SO <sub>3</sub> )	EN 196-2	CEM I...-SR 0	32,5 N	≤ 3,0 M.-%
		CEM I...-SR 3	32,5 R	
		CEM I...-SR 5	42,5 N	
		CEM IV/A...-SR P	42,5 R	≤ 3,5 M.-%
		CEM IV/B...-SR P	52,5 N	
		CEM IV/B...-SR P	52,5 R	
C <sub>3</sub> A-Gehalt in Klinker	EN 196-2 <sup>1)</sup>	CEM I...-SR 0		= 0 <sup>2)</sup>
		CEM I...-SR 3	Alle	≤ 3 M.-% <sup>2)</sup>
		CEM I...-SR 5		≤ 5 M.-% <sup>2)</sup>
		CEM IV/A...-SR P CEM IV/B...-SR P	Alle	≤ 9 M.-% <sup>2)</sup>
Puzzolanität	EN 196-5	CEM IV/A...-SR P CEM IV/B...-SR P	Alle	Positiv nach acht Tagen

<sup>1)</sup> C<sub>3</sub>A = 2,65A – 1,69F

<sup>2)</sup> Prüfmethode soll durch CEN/TC 51/WG 15 entwickelt werden.

hem Sulfatwiderstand. Im Berichtszeitraum wurden je eine Änderung zu EN 197-1 bzw. EN 197-4 für Zemente mit hohem Sulfatwiderstand erstellt und das CEN-Umfrageverfahren durchgeführt.

Gemäß den vorgeschlagenen Normenänderungen werden Zemente mit hohem Sulfatwiderstand mit dem Buchstaben „SR“ für „sulfate resisting“ gekennzeichnet. Insgesamt werden sieben verschiedene Produkte in der Familie der Normalzemente mit hohem Sulfatwiderstand unterschieden (**Tafeln IV-6** und **IV-7**). Durch Angabe einer Zahl oder eines Buchstabens hinter „SR“ werden fünf Unterklassen gebildet. Diese Unterklassen ermöglichen die gezielte Auswahl von SR-Zementen für bestimmte nationale Anwendungsbedingungen.

Keinerlei Zweifel bestanden, dass CEM III/B- und CEM III/C-Zemente uneingeschränkt als sulfatbeständig anzusehen sind. Der Normentwurf ist hier identisch mit den derzeit in Deutschland geltenden Festlegungen. Diese Zemente werden als „SR S“ gekennzeichnet, S steht für „slag“.

Bei den Portlandzementen werden drei Klassen unterschieden. Aufgrund der Erfahrung in vielen Ländern wurde eine C<sub>3</sub>A-Begrenzung von ≤ 3 M.-% vorgesehen. Zusätzlich wurden Portlandzemente mit C<sub>3</sub>A-Gehalten von 0 bzw. ≤ 5 M.-% berücksichtigt, die in einzelnen Ländern ebenfalls genormt sind. Dementsprechend werden die Zemente als SR 0, SR 3 und SR 5 gekennzeichnet.

Puzzolanamente CEM IV/A und CEM IV/B mit SR-Eigenschaften wurden ebenfalls aufgenommen, obwohl sie in nur zwei EU-Ländern hergestellt werden. Sie verfügen jedoch insgesamt über einen relativen Marktanteil von rund 18 M.-%. Der Buchstabe P in „SR P“ steht für Puzzolan. CEM-IV-Zemente sollen in Deutschland von der Anwendung ausgeschlossen werden.

Die Ergebnisse der CEN-Umfrage zu den beiden Normänderungen liegen inzwischen vor. Die bestehenden Entwürfe werden derzeit überarbeitet und das formelle Normabstimmungsverfahren vorbereitet. Sie berücksichtigen knapp 90 % der in Europa hergestellten Zemente mit hohem Sulfatwiderstand. In Gesprächen mit der Kommission wurde vereinbart, dass in die Normentwürfe ein Anhang eingefügt wird. Darin sollen alle Zemente mit hohem Sulfatwiderstand aufgelistet werden, die durch die europäische Norm nicht berücksichtigt sind und in einzelnen EU-Ländern weiterhin einsetzbar bleiben sollen. In solchen Fällen muss allerdings eine andere Kennzeichnung als SR vergeben werden.

#### Flugasche als Zementbestandteil

Im Berichtszeitraum wurde auch eine Änderung A3 zu EN 197-1 erstellt und die formelle Abstimmung in einem verkürzten Verfahren eingeleitet. In der Änderung werden die Anforderungen an Flugasche als Zementbestandteil modifiziert, um sie stärker an die Festlegungen der europäischen Norm für Flugasche als Betonzusatzstoff EN 450 anzupassen. Dies betrifft hauptsächlich den Glühverlust der Flugasche. Es werden die Bereiche 0 bis 5 M.-%, 2 bis 7 M.-% und 4 bis 9 M.-% unterschieden. Der obere Grenzwert des Glühverlusts ist in der CE-Kennzeichnung kenntlich zu machen. Für die Anwendung im Konstruktionsbeton soll der Glühverlust von Flugasche weiterhin auf 5 M.-% begrenzt bleiben.

#### Revision von EN 197-1

Normen müssen in regelmäßigen Abständen überprüft und überarbeitet werden. Da die EN 197-1 nunmehr sechs Jahre besteht, wurde inzwischen planmäßig die Revision eingeleitet. Dabei sollen allerdings nur kleinere Anpassungen vorgenommen werden. Diese beziehen sich u. a. auf die Aktualisierung der Anforderungen an die Zementbestandteile. So wurden inzwischen neue oder überarbeitete Normen für die Betonzusatzstoffe Flugasche (wie zuvor beschrieben), Hüttensand und Silicastaub erstellt oder befinden sich in Vorbereitung. Hier sollen die Festlegungen stärker aneinander angeglichen werden. Auch sollen die

Tafel IV-8: Gültige Ausgabe der Prüfnormen für Zement DIN EN 196

DIN EN 196 Teil	Inhalt	gültige Ausgabe
1	Festigkeit	2005
2	Chemische Analyse	2005 <sup>1)</sup>
3	Erstarren, Raumbeständigkeit	2005
4	Zusammensetzung	- <sup>2)</sup>
5	Puzzolanität	2005
6	Mahlfeinheit	1990
7	Probenahme	1990
8, 9	Hydratationswärme	2004
10	Wasserlösliches Chromat	2006

<sup>1)</sup> Zusätzlich Norm für die Röntgenfluoreszenzanalyse in Arbeit

<sup>2)</sup> Veröffentlichung als CEN-Bericht in Vorbereitung

Anforderungen an Zementzusätze überarbeitet werden, um Forderungen aus dem Trinkwasserbereich gerecht zu werden. Schon jetzt erfüllen die in Deutschland hergestellten Zemente diese Forderung.

Des Weiteren sollen neue Stufen und Klassen eingeführt werden. Dabei sollen Normenteile, die bisher getrennt existieren (Tafel IV-5), in die EN 197-1 eingearbeitet werden. Dies betrifft die Änderungen A1 bis A3 zu EN 197-1 sowie die EN 197-4 einschließlich Änderung A1. Dementsprechend werden die Klassen

- niedrige Anfangsfestigkeit (L)
- niedrige Hydratationswärme (LH) und
- hoher Sulfatwiderstand (SR)

neu in die Norm aufgenommen. Eine entsprechend konsolidierte Fassung der EN 197-1 wurde bereits erstellt.

Zukünftig werden die Anforderungen der Bauproduktenrichtlinie im Hinblick auf Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz stärker zu berücksichtigen sein. Zunächst ist jedoch eine inhaltliche Aufbereitung dieser Thematik erforderlich, bevor entsprechende Konzepte Eingang in die Normung finden.

#### Prüfverfahren ■

Bevor Produkthanforderungen festgelegt werden können, müssen einheitliche Prüfverfahren vorliegen. Die wesentlichen Prüfverfahren für Zement der Normenreihe EN 196 wurden bereits vor rund 15 Jahren fertiggestellt. Heute arbeiten alle Laboratorien in Europa nach vergleichbaren Grundsätzen. Die Basisnormen wurden praktisch unverändert als ISO-Normen übernommen. Dadurch werden diese Verfahren inzwischen auch in zahlreichen Ländern außerhalb Europas angewandt.

Einzelne Normteile wurden zwischenzeitlich überarbeitet bzw. ergänzt. Die Normen EN 196, Teile 1, 2, 3 und 5 sind im Jahr 2005 in einer vollständig überarbeiteten Fassung erschienen (**Tafel IV-8**). Zahlreiche prüftechnische Details wurden aufgrund der inzwischen vorliegenden Erfahrungen überarbeitet, ohne dass sich an den Grundsätzen der Prüfverfahren etwas geändert hätte. So konnte u. a. erreicht werden, dass der in Deutschland gebräuchliche Vibrationstisch inzwischen auch international als anerkanntes Prüfverfahren aufgenommen wurde. Bei der Erstarrungsprüfung mit dem Vicat-Handgerät wurde standardmäßig auf Unterwasserprüfung umgestellt (**Bild IV-8**). Lediglich bei bestimmten Sonderbindemitteln wie Putz- und Mauerbinder soll die Prüfung weiterhin an Luft erfolgen.

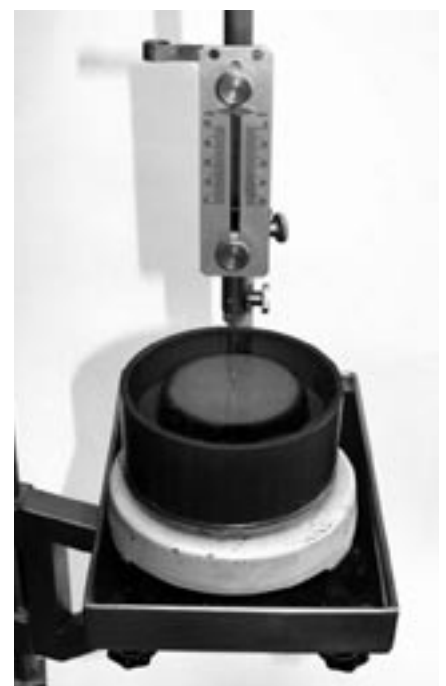


Bild IV-8: Erstarungsprüfung mit dem Vicat-Handgerät mit Unterwasserlagerung



**Bild IV-9:** Versuche zum Vorlöschen von kalkhaltigem Tragschichtbinder: Aussehen des Tragschichtbinders direkt nach dem Mischen (links), nach Ende des Ablöschvorgangs (Mitte) sowie Temperaturentwicklung beim Ablöschen (rechts)

Hierzu soll eine Ergänzung von EN 196-3 vorgenommen werden.

Mit besonders hohem Zeitdruck wurde im Berichtszeitraum an einem Prüfverfahren zur Bestimmung des wasserlöslichen Chromatgehalts gearbeitet, um den Vorgaben der europäischen Chromatdirektive gerecht werden zu können (siehe nachfolgender Abschnitt). Das Prüfverfahren durch Extraktion an einem Mörtel wurde 2006 veröffentlicht.

Insbesondere zur Prozesskontrolle werden in den Werken alternative Verfahren eingesetzt, die eine schnellere und teilweise auch automatische Prüfung ermöglichen. Die Frage gewinnt daher an Bedeutung, inwieweit Alternativverfahren zum Referenzverfahren eingesetzt und ggf. auch genormt werden können. Allerdings darf dadurch die notwendige Genauigkeit der Prüfverfahren nicht beeinträchtigt werden.

In den Werken wird überwiegend die Röntgenfluoreszenzanalyse als Alternativprüfverfahren zu den traditionellen chemischen Referenzprüfverfahren nach EN 196-2 eingesetzt. Daher wird erstmals eine internationale Norm für die Röntgenfluoreszenzanalyse erstellt (siehe Abschnitt III).

Weitere Normungsaktivitäten betreffen die eingeleitete Überarbeitung von EN 196-6 (Feinheit) und EN 196-7 (Probenahme). Auch ist beabsichtigt, ein Prüfverfahren für die Bestimmung des  $C_3A$ -Gehalts zu normen. Dieses Verfahren wird für die Normung von Zementen mit hohem Sulfatwiderstand benötigt.

### Prüfverfahren (Hydratationswärme)

Für die Bestimmung der Hydratationswärme von Zement bietet die europäische Zementnormung zwei gleichberechtigte Referenzverfahren. Dies sind zum einen das in der EN 196-8 beschriebene Lösungsverfahren und zum anderen das in der EN 196-9 genannte teiladiabatische Langavant-Verfahren. Traditionell wird in Deutschland fast überall das Lösungsverfahren genutzt, so auch vom Forschungsinstitut im Rahmen der Güteüberwachung. Während der letzten Jahre fand als weiteres Verfahren die isotherme Wärmeflusskalorimetrie immer mehr Anwendung, insbesondere in Werklaboratorien zur werkseigenen Qualitätskontrolle. Diese Entwicklung ist verständlich, da die Lösungskalorimetrie sowohl sehr arbeitsintensiv ist als auch den Umgang mit Flusssäure, einem sehr giftigen Gefahrstoff, erfordert. Gemäß Gefahrstoffverordnung sind jedoch gefährliche Stoffe soweit wie möglich vom Arbeitsplatz zu verbannen und durch weniger gefährliche Stoffe zu ersetzen (Substitutionsprinzip). Das Forschungsinstitut hat daher die isotherme Wärmeflusskalorimetrie als Alternativverfahren zur Bestimmung der Hydratationswärme validiert und verstärkt für Routineprüfungen eingesetzt. Auf der Ebene von TC51 wurde der Antrag gestellt, die isotherme Wärmeflusskalorimetrie ergänzend zu den zwei bereits bestehenden Verfahren zu normen. Wertvolle Informationen dazu kann der im Jahr 2006 durchgeführte Ringversuch des VDZ liefern. Mit 21 Teilnehmern zur Wärmeflusskalorimetrie und neun Teilnehmern zur Lösungskalorimetrie wurde eine hohe Beteiligung erzielt. Die Ergebnisse zeigen für die fünf untersuchten Zemente eine gute Korrelation zwischen den beiden Methoden. Die beste Übereinstimmung besteht, wenn für die Wärmeflusskalorimetrie eine Hydratationsdauer von etwa 110 Stunden gewählt wird. Sowohl die Wiederhol- als auch Vergleichsstreuung waren bei der Wärmeflusskalorimetrie niedriger als bei der Lösungskalorimetrie.

### Prüfverfahren für Spezialbindemittel

Derzeit wird die europäische Vornorm für Tragschichtbinder in eine Norm umgewandelt. Insbesondere von französischer Seite wurde angeregt, Bindemittel, die zur Bodenverbesserung und Bodenverfestigung eingesetzt werden, stärker als bisher in die Normung einzubeziehen. Diese enthalten neben der hydraulischen Komponente vielfach auch einen nennenswerten Anteil an ungelöschtem Kalk. Die physikalischen Normprüfverfahren nach EN 196-1 und -3 können in diesem Fall nicht uneingeschränkt angewendet werden. Es wurde vorgeschlagen, die Zementnormprüfverfahren so zu modifizieren, dass sie auch für diese Bindemittel eingesetzt werden können. Das vorgeschlagene Prüfverfahren sieht vor, dass die in dem Bindemittel enthaltene Kalkkomponente durch Zugabe einer wohldefinierten Wassermenge abgelöscht wird (**Bild IV-9**). Durch die beim Ablöschprozess entstehenden hohen Temperaturen verdunstet überschüssiges Wasser. An dem so vorgelöschten Bindemittel sollen dann die physikalischen Normprüfverfahren angewandt werden. Anfang 2007 wird ein Ringversuch unter Beteiligung des Forschungsinstituts zur Erprobung dieses Verfahrens durchgeführt. Derzeit ist noch unklar, ob dieses Verfahren auch bei den in Deutschland üblichen Mischbindemitteln mit Kalkgehalten von bis zu 50 % und höher eingesetzt werden kann.

Im Zuge der Normung von Sulfathüttenzementen wurde auch über das Prüfverfahren für die Festigkeitsprüfung beraten. Diese Zemente ergeben bei der Herstellung des Normmörtels nach EN 196-1 sehr dünnflüssige Konsistenzen. Daher wurde in einem Ringversuch überprüft, ob das Prüfverfahren nach EN 196-1 anwendbar ist oder ggf. Modifikationen des Verfahrens, wie z. B. eine Reduzierung des w/z-Werts, vorgenommen werden müssen.

## Chromatreduzierung von Zementen ■

Nach der europäischen Richtlinie 2003/53/EC dürfen Zemente und zementhaltige Zubereitungen (bezogen auf den Zementgehalt) nicht mehr als 2 ppm (0,0002 M.-%) wasserlösliches Chromat enthalten. Dieser Grenzwert wird von den meisten europäischen Zementen rohstoffbedingt überschritten. Deshalb muss der wasserlösliche Chromatanteil der Zemente durch Zugabe eines geeigneten Reduktionsmittels unter 2 ppm gesenkt werden. Für die Bestimmung des wasserlöslichen Chromats empfiehlt die Europäische Kommission das in der im Oktober 2006 veröffentlichten europäischen Norm DIN EN 196-10 beschriebene Prüfverfahren.

Die Reduktion von wasserlöslichem Chromat in Zementen und zementhaltigen Zubereitungen ist in den vergangenen Jahren sowohl für die Zementhersteller als auch für ihre Kunden zu einem Schwerpunktthema geworden. Die Umsetzung der europäischen Richtlinie stellt sich als eine sehr komplexe Aufgabe dar. Denn nicht nur die verfahrenstechnische Durchführung der Chromatreduktion, sondern auch die unterschiedliche Wirksamkeit der verschiedenartigen Reduktionsmittel per se sowie in Abhängigkeit von der Dosierstrategie haben einen wesentlichen Einfluss auf den Erfolg der Reduktionsmaßnahme.

### Chromatreduktion in Deutschland

In Deutschland wurde zunächst fast ausschließlich die Zementsackware durch Zugabe von Chromatreduzierern während der Abpackung chromatarm formuliert. Seit einigen Jahren bietet die deutsche Zementindustrie nahezu ihre gesamte Zementproduktion chromatarm an. Für die Chromatreduktion von Zementsackware wurde vor allem Eisen(II)-sulfat-Heptahydrat in Granulatform als Reduktionsmittel verwendet. Einzelne Hersteller setzten auch pulverförmiges Zinn(II)-sulfat ein. Für die Reduktion der gesamten Zementproduktion eines Zementwerks ist die Dosierung am Ende der Produktion wie bei Sackzementen nicht optimal, da dies einen erheblichen Misch- und Homogenisierungsaufwand bedeutet. Deshalb wurde geprüft, ob die gemeinsame Mahlung von Zementklinker und Reduktionsmittel möglich ist. Eisen(II)-sulfat-Heptahydrat ist für diese Form der Dosierung nicht geeignet, da es aufgrund der hohen Mahltemperaturen sein Kristallwasser an den umgebenden Zement verliert und fein gemahlen wird. Beide Veränderungen verringern vor allem die langfristige Wirksamkeit dieses

Reduktionsmittels. Für eine sichere Reduktion des wasserlöslichen Chromats waren Eisen(II)-sulfat-Heptahydrat-Dosierungen von bis zu 1,0 M.-% bezogen auf den Zement erforderlich. Als vorteilhafter erwies sich diesbezüglich das kristallwasserfreie Zinn(II)-sulfat, das allerdings nur bis zu einer Dosierung von etwa 0,02 bis 0,03 M.-% im Zement wirtschaftlich sinnvoll eingesetzt werden kann. Vor wenigen Jahren wurde im Forschungsinstitut der Zementindustrie deshalb mit der Prüfung möglicher anderer Chromatreduzierer begonnen. Dabei stand vor allem die Leistungsfähigkeit von kristallwasserarmen Eisen(II)-sulfaten als Alternative zum kristallwasserfreien Zinn(II)-sulfat im Mittelpunkt.

Für die Zugabe der Chromatreduzierer zum Zement oder zur zementhaltigen Zubereitung gibt es verschiedene verfahrenstechnische Möglichkeiten. Die damit einhergehenden unterschiedlichen Beanspruchungssituationen beeinflussen die Wirksamkeit der Reduktionsmittel. Die Dosierung in noch warmen Zement stellt beispielsweise eine thermische, die gemeinsame Mahlung mit dem Zementklinker dagegen eine thermische und mechanische Beanspruchung dar. Auch der Zutritt von Luftsauerstoff etwa beim pneumatischen Transport des Chromatreduzierers selbst sowie nach Zugabe zum Zement kann die Wirksamkeit der Reduzierer beeinflussen. In ausführlichen Untersuchungen des Forschungsinstituts der Zementindustrie wurde zudem sogar ein erheblicher Einfluss des Prüfverfahrens, insbesondere der Extraktion des wasserlöslichen Chromats festgestellt.

### Einfluss des Prüfverfahrens

Die Wirksamkeit eines Chromatreduzierers auf Basis von Eisen(II)-sulfat für Zement und zementhaltige Zubereitungen wird im Wesentlichen von zwei Faktoren bestimmt: Der theoretischen Reduktionskapazität, d. h. dem Gehalt an zweiwertigem Eisen, sowie der Verfügbarkeit dieses zweiwertigen Eisens, d. h. seiner Auflösengeschwindigkeit bei der Zugabe von Wasser zum Zement oder zur zementhaltigen Zubereitung. Die Auflösengeschwindigkeit des Chromatreduzierers wird wiederum durch mehrere Faktoren bestimmt:

- Die passive Löslichkeit von Eisen(II)-sulfat nimmt mit steigendem Kristallwassergehalt zu.
- Das Kristallwasser von Hepta- und Tetrahydraten des Eisen(II)-sulfats kann bereits bei Temperaturen unter 60 °C freigesetzt werden und mit dem umgebenden Zement eine die Auflösung

**Tafel IV-9: Wasserlöslicher Chromatanteil von Prüfzement 1 mit verschiedenen Dosierungen der Chromatreduzierer Präparat 1 und Präparat 2 (extrahiert und geprüft nach TRGS 613, mit Oxidation)**

Gehalt an Reduzierer in %	wasserlöslicher Chromatanteil in ppm	
	Präparat 1	Präparat 2
0,0	17,2	17,2
0,3	12,7	0,5
0,5	9,4	0,1
0,7	8,3	0,1
1,0	5,9	0,1
1,5	1,8	< 0,1
2,0	0,1	< 0,1
3,0	< 0,1	< 0,1

behindernde Schicht aus Zementhydratationsprodukten auf der Chromatreduzierer-Partikeloberfläche bilden (Passivierung).

- Die Auflösung der Chromatreduzierer kann mithilfe eines Magnetrührers im Labor oder durch die Gesteinskörnung bei der Herstellung von Mörteln und Betonen mechanisch unterstützt werden.

Zur Untersuchung des Einflusses des gewählten Prüfverfahrens auf das Ergebnis der Chromatbestimmung wurden zwei Eisen(II)-sulfat-Hydrat-Präparate einem Portlandzement (Prüfzement 1) zugemischt. Bei diesen Eisen(II)-sulfat-Hydrat-Präparaten handelte es sich um ein Eisen(II)-sulfat-Monohydrat (Präparat 1) sowie um eine 1:1-Mischung dieses Monohydrats mit einem Eisen(II)-sulfat-Heptahydrat (Präparat 2). Der Prüfzement 1 wies nach der Analysevorschrift im Anhang der TRGS 613 einen Gehalt an wasserlöslichem Chromat von 17,2 µg Cr(VI)/g Zement [= 17,2 ppm Cr(VI)] auf. Zunächst wurden diesem Prüfzement 0,3, 0,5 und 0,7 M.-% des jeweiligen Reduzierers zugemischt. Der Gehalt dieser Mischungen an wasserlöslichem Chromat wurde nach der Extraktions- und Analysevorschrift im Anhang der TRGS 613 bestimmt.

Bei einer Dosierung von 0,3 (entspricht der mittleren Dosierung von Fe(II)-sulfat-Heptahydraten in deutschen Sackzementen) bis 1,0 M.-% des Eisen(II)-sulfat-Monohydrats Präparat 1 zum Prüfzement 1 war der Reduktionserfolg nur gering (**Tafel IV-9**). Erst bei einer Dosierung des Präparats 1 von 1,5 M.-% lag der Gehalt des Prüfzements 1 an wasserlöslichem Chromat unterhalb des geforderten Grenzwerts von 2 ppm. Für eine sichere Chromatreduktion deutlich unter 1 ppm war eine Dosierung des Präparats 1 von 2,0 M.-% erforderlich. Der



**Tafel VI-10: Wasserlöslicher Chromatanteil von Prüfzement 2 mit verschiedenen Dosierungen der Chromatreduzierer Präparat 1 und Präparat 2 (extrahiert nach DIN EN 196-10 und geprüft nach TRGS 613, mit Oxidation)**

Gehalt an Reduzierer in %	wasserlöslicher Chromatanteil in ppm	
	Präparat 1	Präparat 2
0,0	11,4	11,4
0,3	2,1	0,3
0,5	< 0,1	< 0,1
0,7	< 0,1	< 0,1

Chromatreduzierer Präparat 2 hingegen reduzierte den Anteil an wasserlöslichem Chromat in Prüfzement 1 bereits bei einer Dosierung von 0,5 M.-% auf weniger als 0,2 ppm. Die geringe Reduktionswirkung des Monohydrats Präparat 1 ist auf seine geringere Auflösengeschwindigkeit zurückzuführen (s. o.).

Die Auflösengeschwindigkeit von Chromatreduzierern kann mechanisch erhöht werden. Das geschieht im Wesentlichen durch die Schaffung frischer, reaktiver Oberflächen durch Zerkleinerung der Reduziererteilchen. Bei der Extraktion des wasserlöslichen Chromats nach der europäischen Norm DIN EN 196-10 erfolgt diese Zerkleinerung wie in der Praxis durch die zerreibende Wirkung des Sands im Normmörtel. Zemente mit den Chromatreduzierern Präparat 1 und Präparat 2 wurden deshalb auch nach diesem Mörtelverfahren extrahiert und das Extrakt nach TRGS 613 analysiert. Für diese Versuche wurde ebenfalls ein Portlandzement als Prüfzement (Prüfzement 2; 11,4 ppm Cr(VI)) verwendet. Die Ergebnisse dieser Prüfungen sind in **Tafel IV-10** beschrieben. Bereits bei einer Dosierung von 0,5 M.-% lag das Analyseergebnis auch für den Zement mit Präparat 1 unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0,1 ppm wasserlöslichem Chromat.

#### Langzeitwirkung von Eisen(II)-sulfaten

Die Reduktionswirkung von Chromatreduzierern soll nicht nur unmittelbar nach der Herstellung der chromatarmen Zemente gegeben sein, sondern mehrere Monate anhalten. Deshalb wurde auch die Dauerhaftigkeit der Reduktionswirkung der Chromatreduzierer Präparat 1 und Präparat 2 untersucht. Der Reduzierer Präparat 2 wurde wieder mit Prüfzement 1 gemischt und die Mischung nach TRGS 613 extrahiert und analysiert. Präparat 1 wurde wieder in den oben erwähnten Prüfzement 2 eingemischt, durch Herstellung eines Mörtels

**Tafel VI-11: Wasserlöslicher Chromatanteil des Prüfzements 1 mit verschiedenen Dosierungen des Chromatreduzierers Präparat 2 (extrahiert und geprüft nach TRGS 613, mit Oxidation) und des Prüfzements 2 mit verschiedenen Dosierungen des Chromatreduzierers Präparat 1 (extrahiert nach DIN EN 196-10 und geprüft nach TRGS 613 mit Oxidation) nach unterschiedlicher Lagerungsdauer**

	wasserlöslicher Chromatanteil in ppm	
	Präparat 1	Präparat 2
Prüfzement ohne Reduzierer		
ohne Lagerung	11,4	17,2
nach 3 Monaten Lagerung	11,2	17,0
nach 6 Monaten Lagerung	11,1	16,8
nach 9 Monaten Lagerung	11,4	16,7
Prüfzement mit 0,5 % Reduzierer		
ohne Lagerung	< 0,1	0,1
nach 3 Monaten Lagerung	< 0,1	0,2
nach 6 Monaten Lagerung	< 0,1	0,2
nach 9 Monaten Lagerung	< 0,1	0,1
Prüfzement mit 0,7 % Reduzierer		
ohne Lagerung	< 0,1	0,1
nach 3 Monaten Lagerung	< 0,1	< 0,1
nach 6 Monaten Lagerung	< 0,1	0,1
nach 9 Monaten Lagerung	< 0,1	< 0,1

extrahiert und das Extrakt nach TRGS 613 analysiert. Alle Mischungen wurden außerdem drei, sechs und neun Monate lang in geschlossenen Behältern bei Raumtemperatur gelagert und anschließend jeweils wie zuvor beschrieben auf ihren Anteil an wasserlöslichem Chromat analysiert.

Bei einer Dosierung von 0,5 M.-% des Reduzierers Präparat 1 war der Reduktionserfolg auch nach neun Monaten Lagerungsdauer nicht verringert. Der Reduzierer Präparat 2 zeigte über die untersuchte Zeitspanne von neun Monaten eine sehr konstante Reduktionsleistung. Bei einer Dosierung von 0,7 M.-% war die Reduktionsleistung beider Reduzierer dauerhaft gut (**Tafel IV-11**).

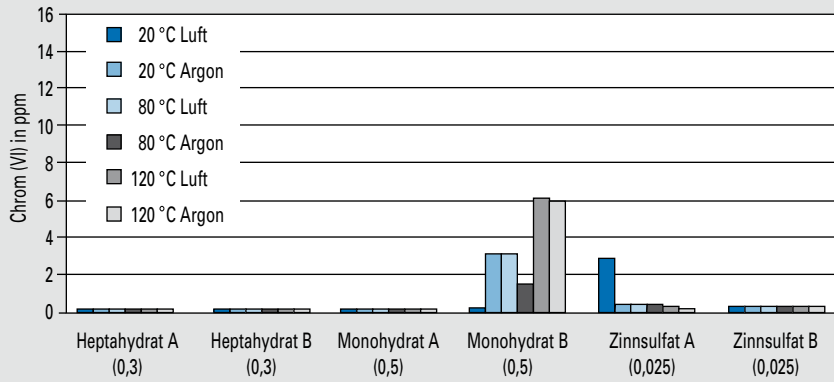
#### Auch Eisen(II)-sulfat-Monohydrate sind geeignete Chromatreduzierer

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse zeigen sehr eindrücklich den Einfluss der mechanisch unterstützten Auflösung der Eisen(II)-sulfat-Hydrate auf ihre Wirksamkeit als Chromatreduzierer. Hydratkrusten verringern zwar die passive Löslichkeit dieser Chromatreduzierer, konservieren aber gleichzeitig das zweiwertige Eisen. Die Hydratkrusten entstehen durch die Reaktion des Kristallwassers der Eisen(II)-sulfat-Hydrate mit dem umgebenden Zement. Eine Ausnahme bildet das Eisen(II)-sulfat-Monohydrat, dessen Kristallwassermolekül sehr stark gebunden ist. Die Auflösung dieser Reduzierer und damit

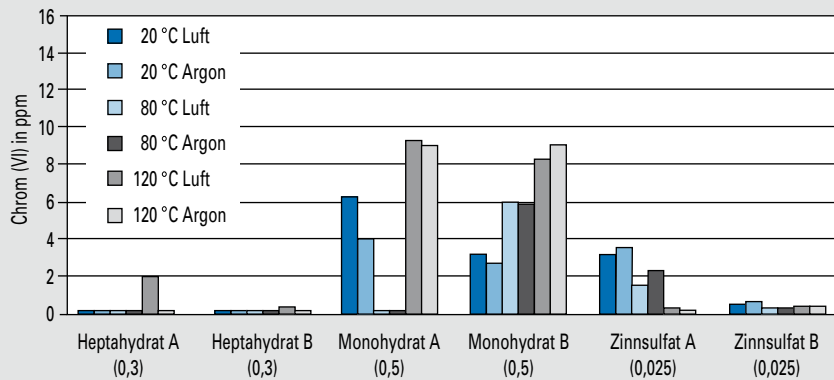
ihre Wirksamkeit wird bei der praktischen Anwendung von Zement in Mörtel und Beton durch die zerreibende Wirkung der Gesteinskörnung mechanisch unterstützt. Das neue europäische Prüfverfahren für die Bestimmung des wasserlöslichen Chromats in Zementen nach DIN EN 196-10 berücksichtigt dies, indem die Extraktion des wasserlöslichen Chromats durch Herstellung eines Normmörtels erfolgt. Besonders deutlich wird die Bedeutung der Praxishöhe dieses Prüfverfahrens für die Bewertung der Leistungsfähigkeit von Eisen(II)-sulfat-Monohydraten als Chromatreduzierer. Ihre geringere passive Löslichkeit führt nach den bisherigen nationalen europäischen Prüfverfahren wie z. B. der TRGS 613 oder dem dänischen Standard DS 1020 zu dem Eindruck, sie seien nur schwach wirksam. Bei Prüfung nach dem in DIN EN 196-10 beschriebenen Verfahren zeigt sich jedoch ihre gute Wirksamkeit. Sie sind zudem aufgrund ihres geringen Kristallwassergehalts weniger empfindlich gegen Passivierung, was sich positiv auf ihre Langzeitwirksamkeit auswirkt.

#### Einfluss thermischer, chemischer und mechanischer Beanspruchung auf die Wirksamkeit von Chromatreduzierern

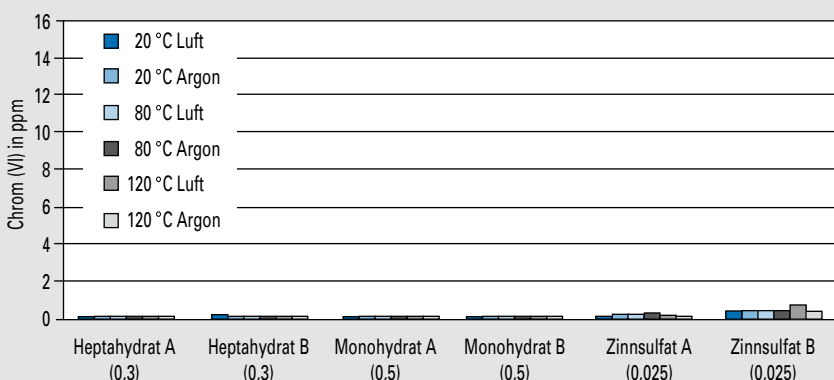
In der Zementindustrie haben sich verschiedene Dosierstrategien für die Zugabe von Chromatreduzierern zum Zement etabliert. Interessant ist vor allem die Zugabe der Reduktionsmittel bereits in der



**Bild IV-10:** Wasserlöslicher Chromatanteil eines Prüfzements nach Zumischung verschiedener Chromatreduzierer (Angaben in Klammern: Dosierung in M.-%) bei unterschiedlichen Zementtemperaturen und Atmosphären im Mischer (Prüfung unmittelbar nach Herstellung der Mischungen; extrahiert und geprüft nach DIN EN 196-10)



**Bild IV-11:** Wasserlöslicher Chromatanteil eines Prüfzements nach Zumischung verschiedener Chromatreduzierer (Angaben in Klammern: Dosierung in M.-%) bei unterschiedlichen Zementtemperaturen und Atmosphären im Mischer (Prüfung nach dreimonatiger Lagerung der Mischungen; extrahiert und geprüft nach DIN EN 196-10)



**Bild IV-12:** Wasserlöslicher Chromatanteil eines Prüfzements nach gemeinsamer Mahlung mit verschiedenen Chromatreduzierern (Angaben in Klammern: Dosierung in M.-%) bei unterschiedlichen Zementtemperaturen und Atmosphären in der Mühle (Prüfung unmittelbar nach Herstellung der Mischungen; extrahiert und geprüft nach DIN EN 196-10)

Zementmühle. Diese Art der Dosierung stellt die beste Möglichkeit dar, das Reduktionsmittel verfahrenstechnisch sicher und vor allem homogen in den Zement einzubringen.

Alle Methoden für die Dosierung stellen jedoch eine Beanspruchung der chemisch empfindlichen Reduktionsmittel dar. Während des pneumatischen Transports der Reduzierer kann eine Oxidation durch Sauerstoff erfolgen. Die oft hohe Temperatur des Zementklinkers bereits vor und während der Mahlung stellt eine erhebliche thermische Belastung dar, die die chemische Umsetzung des Reduzierers beschleunigen und damit seine Wirksamkeit verringern kann. Durch die gemeinsame Mahlung mit Zementklinker wird der Chromatreduzierer außerdem zerkleinert. Dies verringert die Wahrscheinlichkeit der mechanisch unterstützten Auflösung des Reduzierers durch die Gesteinskörnung bei seiner Anwendung in der Praxis.

Die möglichen Beanspruchungen, denen ein Chromatreduzierer bei seiner Zugabe zum Zement ausgesetzt sein kann, wurden in Laborversuchen nachgestellt. Dazu wurden die Chromatreduzierer in einer beheizbaren Laborkugelmühle bei unterschiedlichen Temperaturen (Raumtemperatur, 80 °C, 120 °C) einem Prüfzement zugemischt. Der Mischvorgang erfolgte sowohl in Gegenwart (Laborluft) wie auch unter Ausschluss von Sauerstoff (Argongas), um die Oxidationsempfindlichkeit der Reduzierer zu prüfen. Die gleichen Prüfungen wurden außerdem nach Befüllung der Labormühle mit Mahlkörpern durchgeführt, um den Einfluss der mechanischen Beanspruchung während gemeinsamer Vermahlung von Zement und Chromatreduzierer zu untersuchen.

Für die Untersuchungen wurden zwei Eisen(II)-sulfat-Heptahydrate (Heptahydrat A, Heptahydrat B), zwei Eisen(II)-sulfat-Monohydrate (Monohydrat A, Monohydrat B) sowie zwei Zinn(II)-sulfate (Zinnsulfat A; Zinnsulfat B) eingesetzt.

Heptahydrat A und Heptahydrat B zeigten in den durch Mischen erzeugten Prüfzementen unmittelbar nach ihrer Herstellung sehr gute Wirkung (Bild IV-10). Höhere Temperaturen und Luftsauerstoff führten nach dreimonatiger Lagerung zu

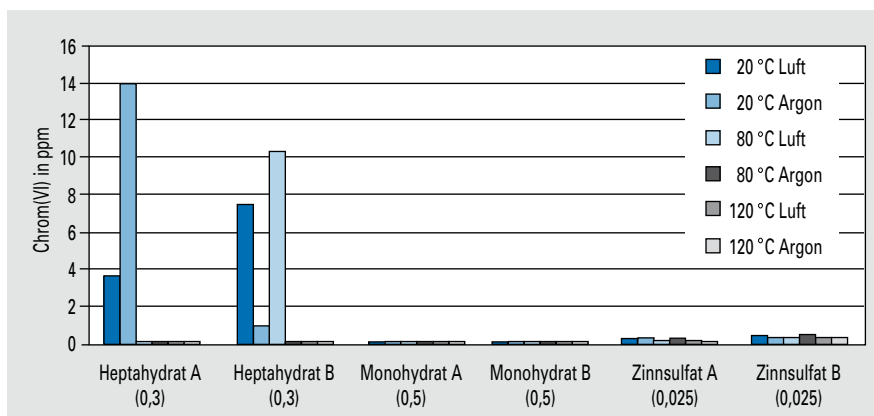
einer verringerten Wirksamkeit dieser Chromatreduzierer (**Bild IV-11**). Durch gemeinsame Mahlung mit dem Zement bei geringen Temperaturen wird die Langzeitwirksamkeit der Heptahydrate verringert. Die mechanisch unterstützte Auflösung der durch die Mahlung bereits zerkleinerten und während der Lagerung durch Hydratkrustenbildung passivierten Reduziererpartikel ist nur noch eingeschränkt möglich (**Bild IV-13**).

Monohydrat A und Monohydrat B zeigten eine unterschiedliche Wirksamkeit, wenn sie dem Zement zugemischt wurden. Monohydrat A zeigte sich unmittelbar nach der Herstellung der Mischungen unempfindlich gegen höhere Temperaturen und Luft-sauerstoff. Dagegen reagierte Monohydrat B auf höhere Temperaturen während des Mischvorgangs durch zunehmenden Wirksamkeitsverlust (**Bild IV-10**). Nach dreimonatiger Lagerung zeigten manche der Mischungen ebenfalls messbare Gehalte an wasserlöslichem Chromat (**Bild IV-11**). Die gemeinsame Mahlung führte allerdings zu einer erstaunlich hohen Wirksamkeit beider Monohydrate, unabhängig von den sonstigen Dosierbedingungen (**Bilder IV-12** und **IV-13**).

Die Zinn(II)-sulfate A und B zeigten eine unterschiedliche aber im Allgemeinen gute Wirksamkeit, wenn sie dem Zement durch Mischen zugegeben wurden. Unmittelbar nach der Herstellung der Mischungen bei geringeren Temperaturen wirkte das grobkörnigere Zinnsulfat A etwas schwächer als das feinpulvrige Zinnsulfat B (**Bild IV-10**). Nach gemeinsamer Mahlung mit dem Zement unter verschiedenartigen Bedingungen wirkten beide Zinn(II)-sulfate jedoch stets sehr zuverlässig (**Bilder IV-12** und **IV-13**).

### Konsequenzen für die Praxis

Für eine gute und vor allem dauerhaft gute Wirksamkeit der Eisen(II)-sulfat-Heptahydrate sollten diese nicht zerkleinert werden, wie dies etwa bei gemeinsamer



**Bild IV-13:** Wasserlöslicher Chromatanteil eines Prüfzements nach gemeinsamer Mahlung mit verschiedenen Chromatreduzierern (Angaben in Klammern: Dosierung in M.-%) bei unterschiedlichen Zementtemperaturen und Atmosphären in der Mühle (Prüfung nach dreimonatiger Lagerung der Mischungen, extrahiert und geprüft nach DIN EN 196-10)

Mahlung mit dem Zement der Fall ist. Denn die Wirksamkeit der Heptahydrate ist stark abhängig von der mechanischen Unterstützung ihrer Auflösung durch Mahl- und Reibeffekte während der praktischen Anwendung der Zemente, die mit ihnen reduziert wurden. Durch diese mechanischen Einflüsse werden passivierende Hydratkrusten von den Reduziererpartikeln entfernt, die aus der Reaktion des umgebenden Zements mit dem Kristallwasser der Reduzierer entstanden sind und deren Auflösung behindern. Aus diesem Grunde sollten Chromatreduzierer auf Basis von Eisen(II)-sulfat-Heptahydraten bevorzugt durch Mischen dem Zement zugegeben werden, weil sie dann noch ausreichend grobkörnig vorliegen für eine mechanische Unterstützung ihrer Auflösung.

Eisen(II)-sulfat-Monohydrate und Zinn(II)-sulfate zeigen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber hohen Temperaturen und Luft-sauerstoff. Die Zerkleinerung durch Mahlung erhöht ihre Reduktionswirkung. Diese Eigenschaften favorisieren diese Reduktionsmittel für eine Zugabe zum Zement durch gemeinsame Mahlung.

Die vorgestellten Ergebnisse der Studie zur Wirksamkeit unterschiedlicher Chromatreduzierer geben Hinweise für die jeweils optimale Art ihrer Dosierung. Bei der verfahrenstechnischen Umsetzung der Chromatreduktion und bereits bei der Dosieranlagenkonzeption müssen die charakteristischen Eigenheiten der einzelnen Reduktionsmittel berücksichtigt werden. Dabei sind nicht nur die chemischen, sondern auch die physikalischen Eigenschaften der Reduzierer, wie z. B. ihre Agglomerationsneigung unter bestimmten Bedingungen, zu beachten. Der Herstellungsprozess für die Reduktionsmittel muss so gestaltet sein, dass ihr Reduktionspotenzial bestmöglich erhalten bleibt und ihre Qualität reproduzierbar ist. Die eigentliche Leistungsfähigkeit der Chromatreduzierer wird allerdings nur durch ein Prüfverfahren richtig dargestellt, das die Auflösung der Reduziererpartikel in der Praxis realistisch abbildet. Ein solches Prüfverfahren für den Nachweis der erfolgreichen Umsetzung der europäischen Richtlinie 2003/53/EC steht mit der europäisch harmonisierten Norm DIN EN 196-10 seit Oktober 2006 zur Verfügung.



## Betonausgangsstoffe, Betontechnologie und Betonbautechnik

Forschung und Dienstleistungen im Bereich „Betontechnik“ umfassen aktuelle und wichtige Fragestellungen auf den Gebieten Betonausgangsstoffe, Betontechnologie und Betonanwendung. Dabei war die Herstellung dauerhafter Bauwerke unter Verwendung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen wieder ein wesentlicher Bestandteil der Forschungsarbeiten. Im Fokus stand die Dauerhaftigkeit von Beton unter Verwendung von Zementen, die neben Portlandzementklinker als weitere Hauptbestandteile Hütensand, Kalkstein und Flugasche einzeln oder in Kombination enthalten. Hierbei wurden die Grenzen möglicher Zementzusammensetzungen innerhalb und außerhalb der Zementnorm DIN EN 197 ausgelotet.

Erneut beschäftigten sich mehrere Forschungsvorhaben mit der Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) im Beton. Schwerpunkte waren die Weiterentwicklung von Gesteinskörnungsprüfverfahren sowie die Entwicklung eines Performance-Prüfverfahrens zur Beurteilung des AKR-Gefährdungspotenzials von Betonzusammensetzungen.

Ein weiterer Fokus der Forschung der Abteilung Betontechnik lag auf dem Zusammenwirken von Zement und Zusatzmitteln. So wurden Fließmittel der neuen Generation, Schwindreduzierer und Luftporenbildner untersucht. Ebenfalls behandelt wurden die Modellierung der Zementhydratation, ultrahochfester Beton (UHPC) sowie Fragen des nachhaltigen Bauens mit Beton.

In den vergangenen Jahren hat die Nachfrage nach betontechnologischer Beratung und gutachterlicher Tätigkeit durch das Forschungsinstitut deutlich zugenommen. Ein Schwerpunkt der Arbeit liegt derzeit in der Entwicklung optimierter Beton- und Mörtelmischungen für den jeweiligen Anwendungsbereich des Kunden. Die Durchführung von Bauwerksanalysen und die Bewertung des Bauwerkszustands gehören ebenso zum Portfolio wie die Erstellung von Instandsetzungskonzepten. Schließlich widmen sich unsere Experten Fragestellungen zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion sowie zum chemischen Angriff auf Beton.

Die Ergebnisse der wissenschaftlichen Arbeiten wurden in Vorträgen und Berichten veröffentlicht und flossen unmittelbar in die Normungsarbeit ein. So wurde auf der Grundlage der im FIZ durchgeführten Untersuchungen der 60-°C-Betonversuch zur weiteren Erfahrungssammlung in einen informativen Anhang der neu herausgegebenen Alkalirichtlinie aufgenommen. Mit dem 60-°C-Betonversuch kann die Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen bereits nach drei Monaten beurteilt werden. In den kommenden Jahren wird der VDZ die Fortschreibung der Alkalirichtlinie weiter aktiv mitgestalten. Dabei steht die Festlegung der Randbedingungen zur Durchführung von Performance-Prüfungen im Mittelpunkt. Mit solchen Performance-Prüfungen wird die Alkaliempfindlichkeit einer festgelegten Betonzusammensetzung beurteilt.



## Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen

An die Herstellungsverfahren und die Anwendungseigenschaften moderner Zemente werden heute vielseitige Anforderungen gestellt. Zum Anforderungsprofil aus der Sicht des Kunden zählt neben dem Festigkeitsbildungspotenzial und einer guten Verarbeitbarkeit insbesondere die Dauerhaftigkeit des mit dem Zement hergestellten Betons. Für den Zementhersteller spielen daneben die Kosten eine Rolle. Darüber hinaus wirken sich zunehmend übergeordnete umweltpolitische Zielvorgaben auf den gesamten Baubereich aus.

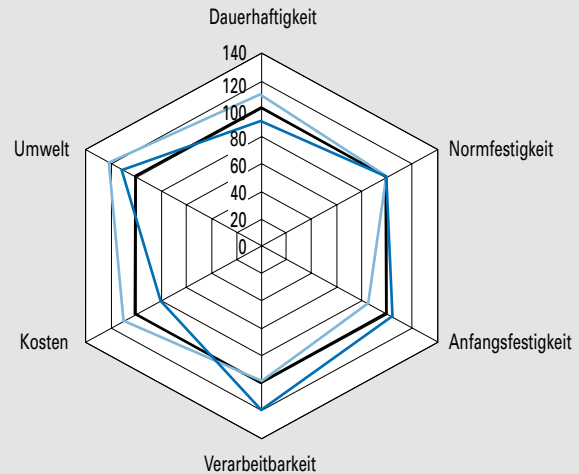
### Technische und ökologische Optimierung

Die Herstellung eines Zements ist eine anspruchsvolle Optimierungsaufgabe, bei der alle Anforderungen angemessen berücksichtigt werden müssen. Der Herstellung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Diese Zemente bieten durch die Verringerung des Klinkergehalts als Folge des Einsatzes anderer Hauptbestandteile eine Möglichkeit, die auf die Tonne Zement bezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Herstellung von Zement zu begrenzen.

Kein Zement – auch nicht der Portlandzement – stellt in allen Anwendungsfällen die optimale Lösung dar. **Bild V-1** zeigt dies in schematischer Darstellung für zwei Arten von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen im Vergleich zum Portlandzement (schwarze Linie), der als Bezugsgröße herangezogen wird. CEM II- und CEM III-Zemente bieten die Möglichkeit, durch die gemeinsame Verwendung mehrerer Hauptbestandteile die individuellen Vorteile der einzelnen Komponenten miteinander zu kombinieren. Neben den Aspekten der CO<sub>2</sub>-Minderung und der Ressourcenschonung bieten Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen hervorragende Möglichkeiten, die anwendungsrelevanten Eigenschaften – wie z. B. die Verarbeitbarkeit, die Festigkeitsentwicklung oder die Dauerhaftigkeit – zu optimieren. CEM II- und CEM III-Zemente sind daher heute in vielen Regionen die Regelzemente für Transportbeton im Hoch- und Ingenieurbau.

Im Fokus der Forschungsarbeiten im Forschungsinstitut steht die Dauerhaftigkeit von Beton unter Verwendung von Zementen, die neben Portlandzementklinker als weitere Hauptbestandteile Hüttensand, Kalkstein und Flugasche einzeln oder in Kombination enthalten. Dabei werden

**Bild V-1:** Schematische Darstellung der Eigenschaften von Zementen und Betonen bei Verwendung zweier Zementarten mit mehreren Hauptbestandteilen (blaue Linien) im Vergleich zum Portlandzement (schwarze Linie), der als Referenzement gewählt wurde



die Grenzen möglicher Zementzusammensetzungen innerhalb und außerhalb der Zementnorm DIN EN 197 ausgelotet. Untersucht werden der Einfluss verschiedener Zemente auf die Porosität und Porengrößenverteilung, die Carbonatisierung, den Chlorideindringwiderstand sowie den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton.

Im Tätigkeitsbericht 2003-2005 wurde über die Eigenschaften von Zementen mit bis zu 35 M.-% Kalkstein – alleine oder in Kombination mit Hüttensand – und deren Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit des Betons berichtet. Gegenstand der im Folgenden dargestellten Untersuchungsergebnisse sind Portlandflugaschezemente mit bis zu 35 M.-% kieselsäurereicher Flugasche (Steinkohlenflugasche V) sowie Portlandkompositzementen mit Flugasche (V) und Hüttensand (S).

### Dauerhaftigkeit von Betonen mit flugaschehaltigen Portlandkompositzementen

Zu Beginn des Jahres 2007 wurde auf Basis der Ergebnisse einer Forschungsarbeit an den Technischen Universitäten in Aachen und München mit der Ergänzung A2 zur DIN 1045-2 die Anrechnung von Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff in Beton bei Frost-Tausalz-Angriff (Expositionsklassen XF2 und XF4) erlaubt. Somit wird auch die Anwendung flugaschehaltiger Zemente für diese Bereiche nicht mehr ausgeschlossen (vgl. Abschnitt Normung). Wird Flugasche als Hauptbestandteil in Portlandkompositzementen eingesetzt, können höhere Flugaschegehalte realisiert werden als bei der Verwendung als Betonzusatzstoff, da durch die Anwendung optimierter Zemente ein praxisgerechtes Leistungsniveau im Beton eingestellt wird.

Im Rahmen der AiF-Forschungsförderung wurden im Forschungsinstitut umfassende

Untersuchungen an Betonen mit flugaschehaltigen Zementen durchgeführt. Die Untersuchungen zeigen, dass die Anwendungsbeschränkungen für flugaschehaltige Zemente zu Recht aufgehoben wurden. Dabei wurde auch die Anrechnung von Flugasche als Betonzusatzstoff auf den Wasserzementwert und den Mindestzementgehalt bei Verwendung flugaschehaltiger Zemente behandelt. Wegen der bis zur Veröffentlichung der A2-Änderung zu DIN 1045-2 bestehenden Anwendungsbeschränkungen für flugaschehaltige Zemente wurde schwerpunktmäßig der Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Betonen betrachtet. Ergänzend wurden aber z. B. auch das Carbonatisierungsverhalten und der Chlorideindringwiderstand der Betone untersucht.

Die Versuchszemente bestanden aus den Hauptbestandteilen Klinker (K), Hüttensand (S) und Steinkohlenflugasche (V1, V2, V3) sowie einem optimierten Sulfat-trägergemisch. Die Flugaschen stammten aus zwei verschiedenen Kraftwerksanlagen, wobei die Flugaschen V1 und V3 die gleiche Herkunft hatten. Die Flugaschen wiesen insbesondere in der Feinheit und in ihrem Glühverlust Unterschiede auf, aber auch die Gehalte an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO und SiO<sub>2</sub> variierten.

Neben der Anwendung der Flugaschen V1, V2 und V3 als Zementhauptbestandteil wurde die Flugasche V2 darüber hinaus als Zusatzstoff im Beton eingesetzt und mit einem k-Wert von 0,4 auf den äquivalenten Wasserzementwert angerechnet.

Die im Labor hergestellten flugaschehaltigen Zemente wurden granulometrisch optimiert. Klinker und Hüttensand wurden auf halbtechnischen Laborkugelmøhlen gemahlen und anschließend mit der Flugasche (vorwiegend im Originalzustand) sowie einem auf die gewünschte Zement-

mischung abgestimmten Sulfatträger gemischt. Die Flugaschegehalte betragen zwischen 20 und 35 M.-% bei den Portlandflugaschezementen, die Portlandkompositzemente bestanden aus 15 bzw. 25 M.-% Flugasche sowie aus 10, 15 bzw. 20 M.-% Hüttensand. Die Feinheit der in diesen Zementen überwiegend verwendeten Steinkohlenflugasche V2 betrug etwa  $3700 \text{ cm}^2/\text{g}$  nach Blaine. Bei einem hohen Flugaschegehalt von 35 M.-% oder bei Verwendung der größeren Flugasche V3 ( $3350 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) wurde eine engere Korngrößenverteilung des Klinkers gewählt, um eine praxisgerechte Zementfestigkeit zu erzielen.

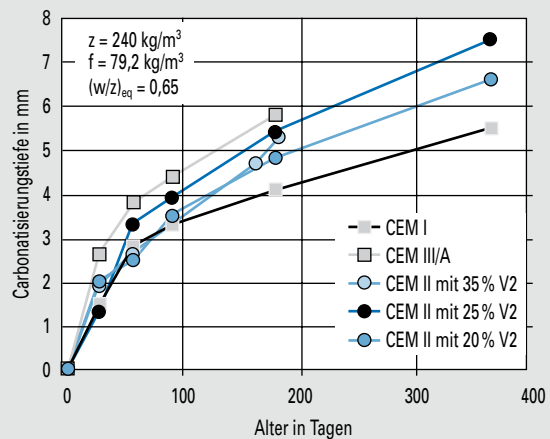
Vergleichende Dauerhaftigkeitsuntersuchungen an Betonen setzen voraus, dass die untersuchten Betone ein vergleichbares Festigkeitsniveau als Kennwert für eine ähnliche Gefügeausbildung aufweisen. Daher sollten die untersuchten Zemente eine vergleichbare 28-d-Druckfestigkeit aufweisen, die im praxisrelevanten Bereich deutscher Zemente der Festigkeitsklasse 32,5 R zwischen etwa 44 und 48 MPa liegt. Als Referenzzemente wurden ein werkseitig hergestellter CEM I und ein Laborzement CEM III/A der Festigkeitsklasse 32,5 R verwendet.

**Carbonatisierung**

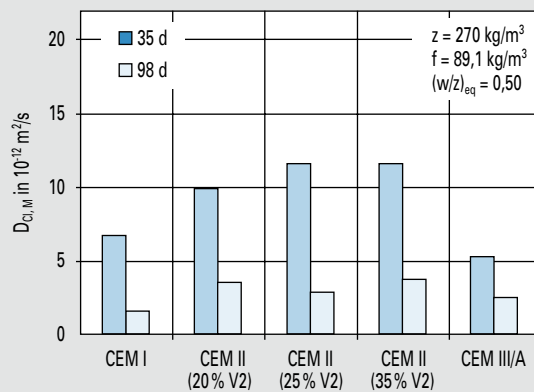
Die Carbonatisierung ist entscheidend für die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton. Die Geschwindigkeit der Carbonatisierung wird dabei von der Diffusion des  $\text{CO}_2$  durch das Porensystem des Betons bestimmt.

**Bild V-2** zeigt beispielhaft die zeitliche Entwicklung der Carbonatisierungstiefen einiger untersuchter Betone, die mit den beiden Referenzzementen bzw. den Portlandflugaschezementen hergestellt wurden. Hier kamen flugaschehaltige Zemente in Kombination mit Flugasche als Zusatzstoff zum Einsatz. Die Betone wurden mit einem Zementgehalt von  $z = 240 \text{ kg}/\text{m}^3$ , einem äquivalenten Wasserzementwert von  $(w/z)_{\text{eq}} = 0,65$  und einem Flugaschegehalt von  $f = 79,2 \text{ kg}/\text{m}^3$  ( $f/z = 0,33$ ) hergestellt. Die Carbonatisierungstiefen der Betone unter Verwendung flugaschehaltiger Zemente lagen unterhalb der Werte des CEM III/A-Betons. CEM III/A kann auch in Kombination mit Flugasche als Betonzusatzstoff für alle Anwendungsbereiche (Expositionsklassen) eingesetzt werden. Die Carbonatisierungstiefen dieser Betone lagen darüber hinaus in dem Wertebereich, der nach Literaturangaben für die Zemente CEM I bis CEM III/B unter den hier vorliegenden Prüfbedingungen anzunehmen ist.

**Bild V-2:** Carbonatisierungstiefen von Betonen mit Portlandflugaschezementen und Referenzzementen sowie Flugasche als Zusatzstoff in Abhängigkeit vom Prüfalter und der Zementzusammensetzung



**Bild V-3:** Chloridmigrationskoeffizienten von Betonen mit Portlandflugaschezementen und Referenzzementen sowie Flugasche als Zusatzstoff in Abhängigkeit vom Prüfalter und der Zementzusammensetzung



Die Ergebnisse bestätigen, dass diese Portlandflugaschezemente auch in Kombination mit Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff in allen Expositionsklassen für carbonatisierungsinduzierte Bewehrungskorrosion verwendet werden können. Die Norm gewährleistet bei Verwendung flugaschehaltiger Zemente gemeinsam mit Flugasche als Betonzusatzstoff eine zusätzliche Sicherheit durch die Begrenzung des anrechenbaren Flugaschegehalts auf  $f/z = 0,25$  anstelle des sonst geltenden Höchstwerts von  $f/z = 0,33$ .

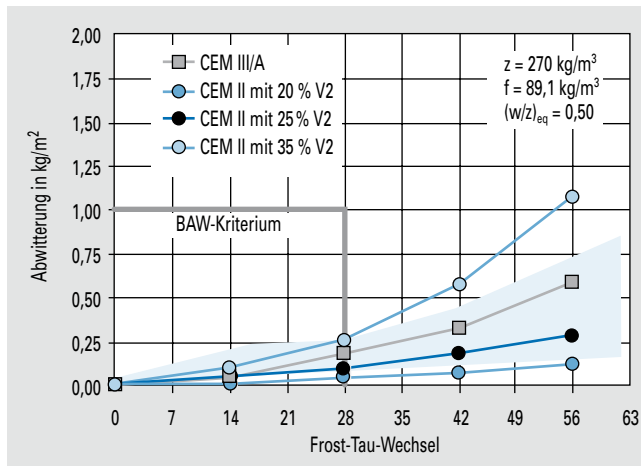
**Widerstand gegenüber dem Eindringen von Chloriden**

Der Widerstand des Betons gegenüber eindringenden Chloriden wurde hier mithilfe eines Schnellverfahrens (Migrationstest) ermittelt. Die Prüfkörper wurden bis zum Prüfalter von 35 Tagen bzw. 98 Tagen wassergelagert.

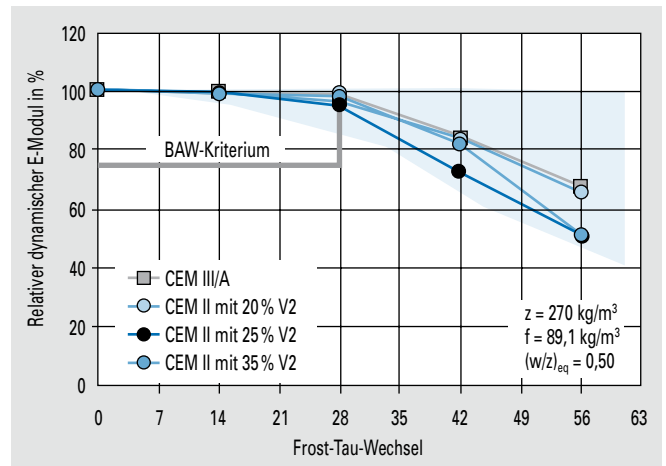
Betone entsprechend der Expositionsklasse XD2/XS2 wurden mit einem Wasserzementwert  $w/z = 0,50$  und einem Zement-

gehalt  $z = 320 \text{ kg}/\text{m}^3$  (ohne Zusatzstoff) hergestellt. Die ermittelten Chloridmigrationskoeffizienten  $D_{\text{Cl,M}}$  bei Verwendung von Portlandflugaschezementen mit bis zu 35 M.-% kieselsäurereicher Flugasche lagen zwischen rund  $10$  und  $20 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  im Alter von 35 Tagen. Probekörper im Prüfalter von 98 Tagen wiesen einen deutlich verringerten Chloridmigrationskoeffizienten  $D_{\text{Cl,M}}$  in der Größenordnung von  $5$  bis  $6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  auf. Die hier ermittelten Messwerte befinden sich im Bereich der für Portlandzemente in der Literatur angegebenen Werte.

Bei Verwendung von Portlandflugaschezementen mit 20, 25 und 35 M.-% Flugasche als Zementhauptbestandteil und gleichzeitiger Verwendung von Flugasche als Betonzusatzstoff wiesen diese Betone nach 35 Tagen einen Chloridmigrationskoeffizienten  $D_{\text{Cl,M}}$  zwischen rund  $10$  und  $12 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  auf (**Bild V-3**). Nach 98 Tagen lagen die Werte auf dem Niveau des CEM III/A-Betons mit Flugasche ( $D_{\text{Cl,M}}$  rund  $3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ).



**Bild V-4:** Abwitterungen von Betonen mit Portlandflugaschezementen und Referenzzement CEM III/A sowie Flugasche als Zusatzstoff in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel und der Zementzusammensetzung (CF-Verfahren); Abnahmekriterium: Abwitterungen  $< 1,0 \text{ kg/m}^2$  nach 28 Frost-Tau-Wechseln; hellblaue Markierung: Wertebereich von CEM I-Betonen, Daten des Forschungsinstituts



**Bild V-5:** Relativer dynamischer E-Modul von Betonen mit Portlandflugaschezementen und Referenzzement CEM III/A sowie Flugasche als Zusatzstoff in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel und der Zementzusammensetzung (CIF-Verfahren); Abnahmekriterium: relativer dynamischer E-Modul  $> 75 \%$  nach 28 Frost-Tau-Wechseln; hellblaue Markierung: Wertebereich von CEM I-Betonen, Daten des Forschungsinstituts

Die Ergebnisse bestätigen, dass Portlandflugaschezemente in Kombination mit Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff auch in allen Expositionsklassen für chloridinduzierte Bewehrungskorrosion verwendet werden können. Auch hier begrenzt die Betonnorm den anrechenbaren Flugaschegehalt bei gleichzeitiger Verwendung von Flugasche als Zementhauptbestandteil und Betonzusatzstoff auf  $f/z = 0,25$ .

**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. mithilfe der Messung der Ultraschalllaufzeit und dem hieraus abgeleiteten dynamischen E-Modul festgestellt werden. Im Folgenden werden Ergebnisse der Prüfungen des Frostwiderstands nach dem CF-/CIF-Verfahren sowie Ergebnisse der Prüfungen des Frost-Tausalz-Widerstands nach dem CDF-Verfahren dargestellt und bewertet. In Deutschland wurden von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Grenzwerte für Abwitterungen (CF-/CDF-Verfahren) und Grenzwerte für innere Gefügeschädigungen (CIF-Verfahren) im Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ festgelegt.

In den durchgeführten Versuchen zeigten Betone, in denen flugaschehaltige Zemente mit Flugaschegehalten zwischen 20 und 35 M.-% in Kombination mit Flugasche als Betonzusatzstoff (Zementgehalt  $z = 270 \text{ kg/m}^3$ , äquivalenter Wasserze-

mentwert  $(w/z)_{\text{eq}} = 0,50$ , Flugaschegehalt  $f = 89,1 \text{ kg/m}^3$ ) eingesetzt wurden, keine signifikant höheren Abwitterungen als die Betone mit den Referenzzementen CEM I und CEM III/A. **Bild V-4** zeigt, dass die ermittelten Abwitterungen nach dem CF-Verfahren bei allen Betonen deutlich unterhalb des im Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) festgelegten Abnahmekriteriums von  $1,0 \text{ kg/m}^2$  nach 28 Frost-Tau-Wechseln blieben. Wie im **Bild V-5** dargestellt, wiesen diese Betone nach 28 Frost-Tau-Wechseln einen relativen dynamischen E-Modul von mehr als 75 % (BAW-Abnahmekriterium für das CIF-Verfahren) auf.

Mit dem CDF-Test wird der Widerstand gegenüber einer Frost-Tauwechsel-Belastung bei gleichzeitiger Taumittelbelastung geprüft. Bei der Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands von Betonen mit künstlichen Luftporen ist die Oberflächenabwitterung dominant und für die Beurteilung vorrangig. Der Frost-Tausalz-Widerstand wurde an Betonen ohne Zusatzstoff mit einem Zementgehalt  $z = 320 \text{ kg/m}^3$  und einem Wasserzementwert  $w/z = 0,50$  geprüft. Die Ergebnisse sind im **Bild V-6** dargestellt. Die Abwitterungen der mit dem Portlandzement und den flugaschehaltigen Zementen hergestellten Betone lagen zwischen  $300$  und  $900 \text{ g/m}^2$  nach 28 Frost-Tau-Wechseln und somit deutlich unterhalb des für dieses Verfahren eingesetzten Abnahmekriteriums von  $1500 \text{ g/m}^2$  nach 28 Frost-Tau-Wechseln.

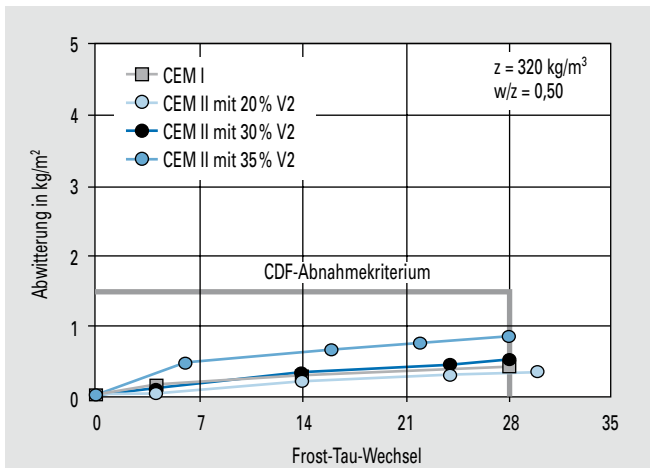
#### Hüttensand als weiterer Hauptbestandteil in flugaschehaltigen Portlandkompositzementen

Im Rahmen des beschriebenen Forschungsprojekts wurden auch Betone mit Portlandkompositzementen untersucht, die neben Klinker und Steinkohlenflugasche Hüttensand als weiteren Hauptbestandteil enthalten. **Bild V-7** zeigt beispielhaft die im CIF-Verfahren (Frostangriff ohne Taumittel) ermittelten relativen dynamischen E-Moduln der Betone mit einem Wasserzementwert  $w/z = 0,50$  und einem Zementgehalt  $z = 320 \text{ kg/m}^3$  (ohne Zusatzstoff). Eine Differenzierung der Betone mit den verschiedenen flugasche- und hüttensandhaltigen Zementen war nicht feststellbar. Das im BAW-Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ festgelegte Abnahmekriterium von 75 % nach 28 Frost-Tau-Wechseln wurde von den hier untersuchten Betonen mit deutlichem Abstand eingehalten. Die relativen dynamischen E-Moduln der Betone mit Portlandkompositzementen lagen im Bereich der Werte von Betonen mit Portlandzementen. Die Abwitterungen der Betone blieben mit maximal  $0,17 \text{ kg/m}^2$  nach 56 Frost-Tau-Wechseln deutlich unter dem BAW-Abnahmekriterium von  $1,0 \text{ kg/m}^2$  nach 28 Frost-Tau-Wechseln.

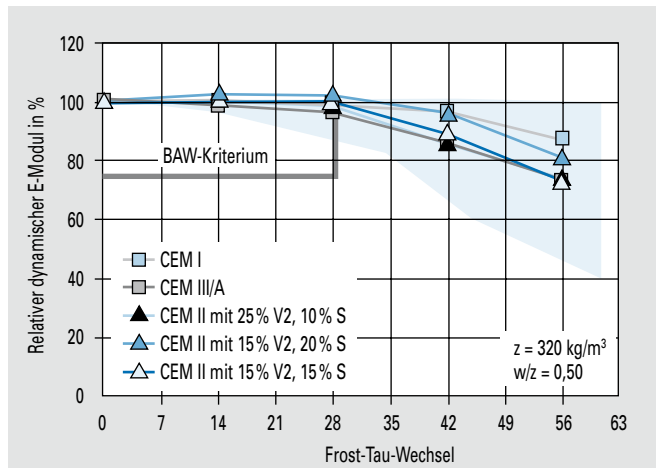
#### Einfluss der Qualität und der Feinheit der Flugasche

In einigen Tastversuchen wurden Zemente mit 30 M.-% Flugasche unterschiedlicher Qualität (Glühverlust) bzw. unterschiedlicher Feinheit hergestellt. An den mit diesen Zementen hergestellten Betonen ohne Zusatzstoff wurden der Chloridein-





**Bild V-6:** Abwitterungen von Luftporenbetonen mit Portlandflugaschezementen und Portlandzement in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel und der Zementzusammensetzung (CDF-Verfahren); Abnahmekriterium: Abwitterungen < 1,5 kg/m<sup>2</sup> nach 28 Frost-Tau-Wechseln



**Bild V-7:** Relativer dynamischer E-Modul von Betonen mit flugaschehaltigen Portlandkompositzementen und Referenzzementen in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel und der Zementzusammensetzung (CIF-Verfahren); Abnahmekriterium: relativer dynamischer E-Modul > 75 % nach 28 Frost-Tau-Wechseln; hellblaue Markierung: Wertebereich von CEM I-Betonen, Daten des Forschungsinstituts

dringwiderstand und der Frostwiderstand geprüft.

Die Anwendung der unterschiedlichen Flugaschequalitäten (V1, V2 und V3 mit Glühverlusten von 2,9 bis 7,0 M.-%) als Zementhauptbestandteil brachte in den Untersuchungen der Betone keine signifikanten Unterschiede hervor.

Beispielhaft sei hier der Frostwiderstand erwähnt. Die Prüfungen nach dem CF-/CIF-Verfahren zeigten an den Betonen (Zementgehalt  $z = 320 \text{ kg/m}^3$ , Wasserzementwert  $w/z = 0,50$ ) unter Verwendung der Zemente mit den Flugaschen V1, V2 oder V3 Abwitterungen von 0,09 bis 0,15 kg/m<sup>2</sup> bzw. einen relativen dynamischen E-Modul von 84 bis 92 % nach 28 Frost-Tau-Wechseln.

Die Verwendung eines Zements mit 30 M.-% gemahlener Flugasche V2 (Feinheit 4400 cm<sup>2</sup>/g nach Blaine) führte im Vergleich zu einem Zement mit Flugasche im Originalzustand (Feinheit 3700 cm<sup>2</sup>/g nach Blaine) bei konstanter Klinkerfeinheit zu einer um 6 bis 9 MPa höheren Druckfestigkeit nach 28 bzw. 91 Tagen.

Der Widerstand des aus diesem Zement hergestellten Betons gegenüber dem Eindringen von Chloriden nahm zu. Wie aus dem **Bild V-8** hervorgeht, erreichte der Chloridmigrationskoeffizient des Betons (Zementgehalt  $z = 320 \text{ kg/m}^3$ , Wasserzementwert  $w/z = 0,50$ ) im Prüfalalter von 35 Tagen einen Wert von  $20 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  unter Verwendung des Zements mit Flugasche

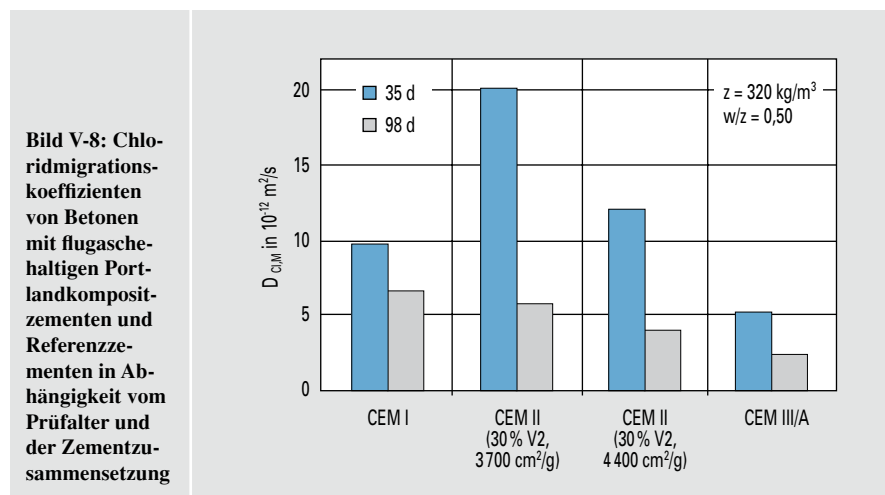
im Originalzustand. Bei Verwendung des Zements mit feinerer Flugasche verringerte sich der Wert auf  $12 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ . In den Untersuchungen des Frostwiderstands nach dem CF-/CIF-Verfahren zeigten sich ebenfalls positive Effekte an diesen Betonen: Die äußeren und inneren Schädigungen wurden weiter reduziert.

**Ausblick**

Untersuchungen zu den Eigenschaften von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen sowie zur Anwendung dieser Zemente im Beton sind auch weiterhin Bestandteil der Arbeiten des Forschungsinstituts. So wurden z. B. im Rahmen des europäischen Netzwerks ECOserve ([www.eco-serve.net](http://www.eco-serve.net)) erste Versuche mit Zementen durchgeführt, die neben Portlandzementklinker 30 bis 50 M.-% Hüttensand sowie 20 M.-% Kalkstein enthalten und damit außerhalb

der Zementnorm DIN EN 197-1 liegen. Hier konnte durchweg eine deutliche Verbesserung des Chlorideindringwiderstands der Betone im Vergleich zum Portlandzementbeton festgestellt werden. Die Werte für die Carbonatisierung und den Frost-Tausalz-Widerstand lagen bei diesen ersten Tastversuchen jedoch z. T. im Grenzbereich.

Weitere Untersuchungen mit diesen und ähnlichen Zementzusammensetzungen erfolgen innerhalb einer Forschungsarbeit mit dem Titel „Ökologisch und technisch optimierte Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen“. Diese Arbeit wird im Rahmen der Fördermaßnahme „klimazwei – Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen“ ([www.klimazwei.de](http://www.klimazwei.de)) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) durchgeführt. In



**Bild V-8:** Chloridmigrationskoeffizienten von Betonen mit flugaschehaltigen Portlandkompositzementen und Referenzzementen in Abhängigkeit vom Prüfalalter und der Zementzusammensetzung

dem Vorhaben ist neben den Laboruntersuchungen an Zementen, die auf den Mahl- und Mischanlagen des Forschungsinstituts hergestellt werden, auch die großtechnische Herstellung neuer Zemente geplant. Für die aus diesen Zementen hergestellten Betone ist darüber hinaus eine Beobachtung unter Praxisbedingungen vorgesehen. Das Projekt wird inhaltlich durch einen projektbegleitenden Ausschuss begleitet. In diesem Ausschuss sind neben den Projektpartnern VDZ, Spenner Zement GmbH & Co. KG, HeidelbergCement AG, Bundesanstalt für Wasserbau und Ingenieurbüro Prof. Schießl auch die Transportbetonindustrie, die Hüttensanderzeuger, die Flugascheindustrie, die Bauindustrie sowie der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton vertreten. Für die Fördermaßnahme „Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen“ wurde ein Begleitprozess eingerichtet, der insbesondere kommunikative Aufgaben wahrnimmt. Der Begleitprozess wird von der Forschungsstelle Ökonomie/Ökologie des Instituts der deutschen Wirtschaft Köln (IW) durchgeführt.

## Zement und Zusatzmittel ■

Bei der Betonherstellung gehört der Einsatz von Betonzusatzmitteln zur Steuerung von Frisch- und Festbetoneigenschaften 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. Betonverflüssiger (BV) und Fließmittel (FM) bilden mit einem Anteil von rund 75 % den Schwerpunkt.

Über die genauen Wirkungsmechanismen einiger Betonzusatzmittel fehlen wissenschaftlich begründete Kenntnisse noch weitgehend. Der Einfluss von Betonzusatzmitteln auf die Hydratation von Zement und somit auf die Frisch- und/oder Festbetoneigenschaften wird meist empirisch bestimmt und kontrovers diskutiert. Das gilt insbesondere für Fließmittel auf der Basis von Polycarboxylatethern, für Schwindreduzierer sowie für neuartige Luftporen bildende Betonzusatzmittel, die Gegenstand umfangreicher Untersuchungen im Forschungsinstitut waren.

### Fließmittel

Für eine optimale Verarbeitbarkeit von Hochleistungsbeton, wie z. B. hochfestem oder selbstverdichtendem Beton, ist der Einsatz leistungsfähiger Fließmittel unerlässlich.

Synthetische organische Polymere mit Carboxylgruppen, wie z. B. Polycarboxylatether (PCE), stellen eine Weiterentwicklung auf dem Gebiet der Fließmittelwirkstoffe dar. Etwa 45 % aller verwendeten Fließmittel basieren heute bereits auf PCE – mit steigender Tendenz. PCE bestehen aus Hauptkettenmolekülen, wie 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 seiner Hydratationsprodukte sowie anderer feiner Feststoffpartikel an. Die dispergierende Wirkung ist hauptsächlich auf die sterische, d. h. räumliche Abstoßung der Seitenketten zurückzuführen. Durch Variation der Ladung und des Längenverhältnisses von Hauptkette zu Seitenkette lassen sich unterschiedliche Eigenschaften, wie eine starke Anfangsverflüssigung und/oder eine verlängerte Verarbeitungszeit von Frischbeton, erzielen. Das kann jeweils mit einer unterschiedlichen Verzögerung der Zementerhärtung verbunden sein. Es ist jedoch nicht exakt bekannt, wie die Fließmittelmoleküle an den Zementkörnern und anderen feinen Feststoffpartikeln sorbiert werden. Auch der Einfluss des chemischen Aufbaus der Fließmittelmoleküle und der chemischen Zusammensetzung der Zemente sowie der Umgebungsbedingungen auf die Dispergierung ist noch nicht vollständig geklärt. Die Praxis zeigt, dass PCE empfindlicher gegenüber Temperaturschwankungen oder Schwankungen der Zementzusammensetzung reagieren können als die klassischen Fließmittel. 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 erforderlich.

Deshalb wurde in einem von der AiF geförderten Forschungsvorhaben der Einfluss des chemischen Aufbaus der PCE-Moleküle und der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung von Zementen auf die Dispergierung und Festigkeitsentwicklung von Leimen und Mörteln untersucht. Systematisch wurden die wesentlichen zusatzmittel- und zementseitigen Parameter erfasst, die zu unerwünschten Reaktionen führen können, wie z. B. schnellem Verlust der Verarbeitbarkeit oder geringer Frühfestigkeit.

### Zemente und PCE-Fließmittel

Es wurde eine Datenbasis über die chemische Zusammensetzung und molekulare Struktur von Fließmitteln auf der Basis von PCE und über die chemisch-mineralogische und physikalische Zusammensetzung von handelsüblichen Zementen erstellt. Insgesamt wurden drei Lieferchargen 15 handelsüblicher Fließmittel auf der Basis von PCE und zehn handelsübliche Zemente unterschiedlicher Hersteller analysiert. Darüber hinaus wurde die Zusammensetzung der Porenlösung der mit diesen Zementen und Fließmitteln hergestellten Zementleime über einen Hydratationszeitraum von bis zu 120 Minuten ermittelt.

Die Analyse der Fließmittel ergab, dass einige der 15 Fließmittel nahezu identische PCE-Moleküle enthielten. Insgesamt wurden acht unterschiedliche PCE-Typen ermittelt, die in **Tafel V-1** aufgeführt sind. Die über die GPC- und NMR-Analyse ermittelten Hauptkettenlängen lagen zwischen 27 und 144 Methacrylsäure (MAA)-Einheiten. Die Seitenketten waren jeweils aus 19 bis 116 Ethylenoxid (EO)-Einheiten zusammengesetzt. Die auf die Hauptkette bezogene Ladungsmenge lag zwischen 0,5 und 23 Ladungsäquivalenten. Einen Überblick über die an den drei Lieferchargen der 15 Fließmittel jeweils ermittelten molaren Masse  $M_w$  gibt **Bild V-9**. Die einzelnen Lieferchargen der Fließmittel wiesen im Allgemeinen eine gute Übereinstimmung auf. Eine höhere Gleichmäßigkeit bei industriell hergestellten Polymerisaten ist in der Regel nicht zu erwarten. Abweichungen, wie z. B. die der ersten Charge von FM01 im Vergleich zur zweiten und dritten Liefercharge, waren fast ausschließlich auf hochmolekulare, konzentrationsmäßig jedoch weitgehend unbedeutende Masseanteile im Polymer zurückzuführen, die die Wirkung des Fließmittels nicht signifikant beeinflussten.

Der Sulfatgehalt der Porenlösung von Zementleim lag drei Minuten nach der Wasserzugabe zwischen rund 3,5 und rund 15,5 g/l. Diese Schwankungsbreite ist hauptsächlich auf die unterschiedliche Zusammensetzung und Löslichkeit der Sulfatträger und auf die verschiedenen Alkalisulfatgehalte der zehn untersuchten Zemente zurückzuführen. Bereits diese Unterschiede können die Sorption der PCE und somit deren Wirksamkeit deutlich verändern. Bezogen auf den jeweiligen Gesamtgehalt waren drei Minuten nach Wasserzugabe rund 4 bis 21 M.-% des Sulfats, rund 7 bis 21 M.-% des Natriums und rund 44 bis 69 M.-% des Kaliums gelöst.

### Sättigungspunkt und Zeta-Potenzial

Die vollständige Dispergierung von Zementleim, d. h. der Sättigungspunkt, wurde mit Fließmitteln mit hoher Ladungsdichte auf der Hauptkette am schnellsten erreicht. Ein signifikanter Einfluss der Hauptkettenlänge auf die Wirkung der PCE wurde nicht festgestellt. Alle Sättigungspunkt-dosierungen lagen innerhalb des vom Hersteller empfohlenen Dosierbereichs. Teilweise trat der Sättigungspunkt bereits im ersten Viertel des empfohlenen Dosierbereichs ein. In diesem Fall ist besondere Sorgfalt bei der Zugabe notwendig, da bei einer Dosierung über den Sättigungspunkt hinaus eine „aufstockende“ Sedimentation des Zementleims (Bluten des Betons) eintreten kann.

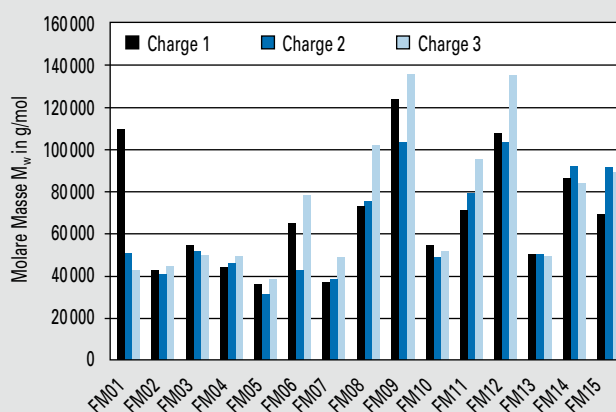
Das Zeta-Potenzial ist ein elektrokinetisches Potenzial in der Grenzfläche zwischen dem bewegten und dem starren Teil der Doppelschicht, die sich an der Phasengrenze zwischen Festkörpern und wässrigen Lösungen bildet. Das Potenzial gibt Hinweise über die Ladungsverhältnisse an der Partikeloberfläche. Die Zugabe der PCE-Fließmittel zum Zementleim führte stets zu einer positiven Verschiebung des Zeta-Potenzials in Richtung des isoelektrischen Punkts, also zu geringeren Absolutwerten hin. Das ist vermutlich u. a. auf eine durch die Molekülstruktur der PCE, insbesondere durch die Seitenketten, bedingte Verschiebung der Scherebene zurückzuführen, in der das Zeta-Potenzial ermittelt wird. Dabei korrelierte die Verschiebung der Scherebene nicht immer mit der Seitenkettenlänge der PCE-Moleküle. Wie aus **Bild V-10** exemplarisch für alle untersuchten Zement-Fließmittel-Kombinationen hervorgeht, korrelierten Zeta-Potenzial und Scherwiderstand. Der jeweilige Sättigungspunkt (SP) der Fließmittel – im Bild mit einem Pfeil gekennzeichnet – konnte sowohl aus dem Verlauf des Scherwiderstands des Zementleims als auch aus dem Verlauf des Zeta-Potenzials ermittelt werden.

### Einfluss von Sulfationen

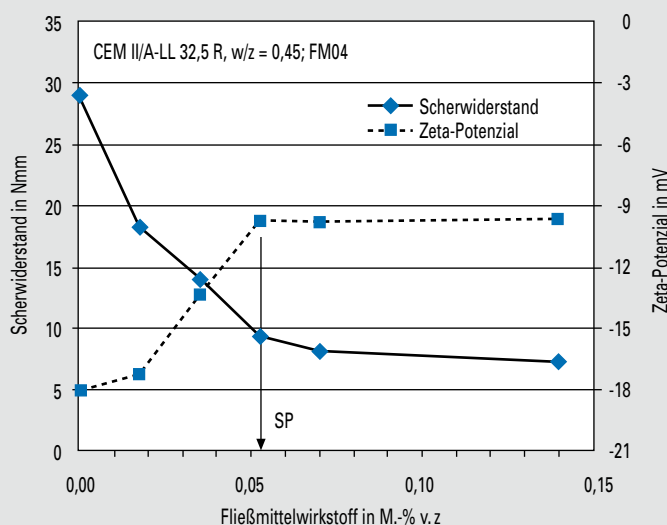
Zwischen Sulfationen in der Porenlösung und den PCE-Molekülen fand eine kompetitive Sorption statt. Sulfationen können die Sorption und damit die Wirksamkeit insbesondere von Fließmitteln mit geringer Ladungsdichte deutlich beeinträchtigen. Fließmittel mit einer geringen Ladungsdichte auf der Hauptkette wurden generell langsamer und in geringerem Umfang sorbiert als Fließmittel mit einer hohen Ladungsdichte. Die Sorption von PCE-Mo-

**Tafel V-1: Molekülstruktur von 15 handelsüblichen Fließmitteln (FM01-FM15) auf der Basis von PCE (Methacrylsäureeinheiten (MAA) je Hauptkette; Ethylenoxideinheiten (EO) je Seitenkette, Ladungsmenge je Hauptkette; Fließmittel mit nahezu identischer Molekülstruktur sind zusammengefasst)**

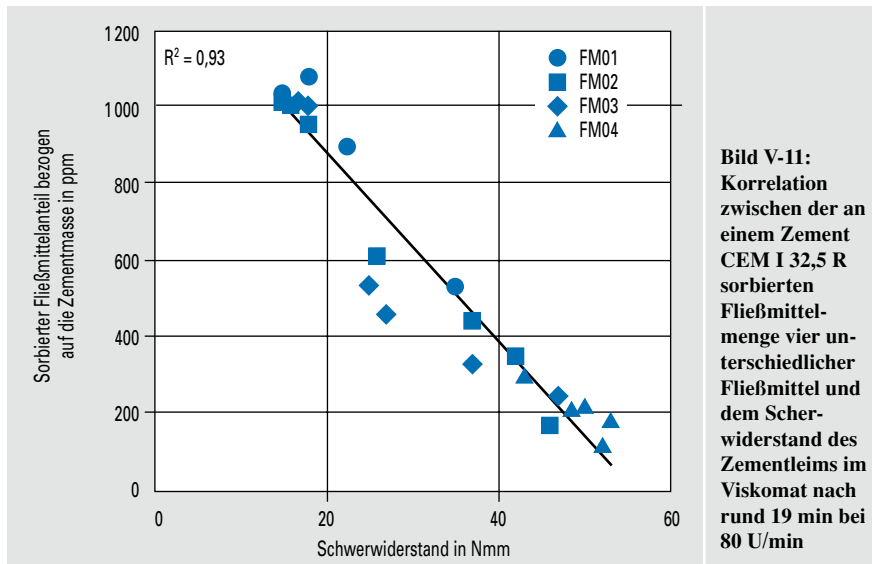
Typ-Nr.	Fließmittel	MAA/Hauptkette	EO/Seitenkette	Ladungsmenge/Hauptkette
1	FM01	32	111	2
	FM10	27	116	2
	FM13	31	90	2
2	FM08	94	17	9
	FM11	119	20	12
	FM14	144	20	13
	FM15	135	20	13
3	FM03	130	21	19
	FM04	131	21	23
4	FM09	79	93	3
	FM12	75	86	3
5	FM02	64	19	7
6	FM05	69	19	0,5
7	FM06	36	38	0,6
8	FM07	102	20	18



**Bild V-9: Molare Masse ( $M_w$ ) einzelner Lieferchargen von 15 handelsüblichen Fließmitteln auf der Basis von PCE**



**Bild V-10: Scherwiderstand und Zeta-Potenzial in Abhängigkeit von der Fließmittelwirkstoffmenge; der Pfeil kennzeichnet den „Sättigungspunkt“ (SP)**



**Bild V-11:** Korrelation zwischen der an einem Zement CEM I 32,5 R sorbierten Fließmittelmenge vier unterschiedlicher Fließmittel und dem Scherwiderstand des Zementleims im Viskomat nach rund 19 min bei 80 U/min

lekülen und insbesondere die abschirmende Wirkung der Seitenketten führte zu einer Erhöhung der Sulfatgehalte in der Porenlösung. PCE mit geringer Ladungsdichte wirkten, aufgrund der schwächeren Sorption, länger als PCE mit hoher Ladungsdichte auf der Hauptkette (Depotwirkung). **Bild V-11** zeigt beispielhaft für die Zugabe von vier verschiedenen PCE, dass der Scherwiderstand und die am Zement sorbierte Fließmittelmenge korrelierten.

Eine Erhöhung des Anteils an gelöstem Sulfat durch Zugabe von Natriumsulfat führte bei Zementleimen mit PCE immer zu einer Zunahme des Scherwiderstandes, d. h. zu einer Beeinträchtigung der Verarbeitbarkeit. Bei schwach geladenen PCE war dies, entsprechend der in Bild V-11 dargestellten Korrelation, auf eine Verringerung der sorbierten Fließmittelmenge durch die kompetitive Sorption der Sulfationen zurückzuführen. Bei einigen stärker geladenen PCE konnte bei gleicher sorbierter Fließmittelmenge mithilfe der Zeta-Potenzial-Messung eine Veränderung des Adsorptionsmodus der PCE-Moleküle festgestellt werden, welche die Verarbeitbarkeit der Zementleime beeinträchtigte.

PCE, die aufgrund ihrer hohen Ladungsdichte eine starke Sorption aufwiesen, verzögerten das Erstarren und verringerten die Mörteldruckfestigkeiten bis zu einem Alter von zwei Tagen signifikant. Die weitere Druckfestigkeitsentwicklung wurde durch die verwendeten PCE kaum beeinflusst.

Wie bereits oben genannt, kann der Sulfatgehalt der Porenlösung verschiedener handelsüblicher Zemente, aufgrund unterschiedlicher Sulfatträger und Alkalisulfatgehalte, deutlich variieren. Neben

dem Einfluss von gelöstem Sulfat in der Porenlösung haben u. a. die chemisch-mineralogischen und physikalischen Kennwerte der Zemente einen wesentlichen Einfluss auf die Sorption und somit auf die Wirksamkeit der Fließmittel. Hierbei sind insbesondere der Gehalt und die Kristallmodifikation des  $C_3A$ , die Zusammensetzung der Sulfatträger und die Mahlfineinheit zu nennen, die für die Ausbildung der für die Sorption der Fließmittel zur Verfügung stehenden Oberflächen verantwortlich sind. Hinzu kommen u. a. Einflüsse aus der Frischbetontemperatur, der Zugabereihenfolge und der Mischzeit. Um eine optimale Verflüssigung zu erreichen, muss deshalb das Fließmittel auf den jeweiligen Anwendungsfall, d. h. auf den Zement und die oben genannten betontechnologischen Parameter, abgestimmt werden.

In diesem Zusammenhang fehlen noch Erkenntnisse zur Wechselwirkung der Fließmittel mit weiteren Zementhauptbestandteilen wie Hüttsand oder Kalksteinmehl. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass sich für eine hohe Anfangsverflüssigung PCE mit hoher Ladungsdichte eignen, die relativ unabhängig vom Sulfatgehalt in der Porenlösung an der Zementoberfläche sorbieren können. Hierbei können lange Seitenketten die Verflüssigungsdauer verlängern. Aufgrund der starken Sorption ist jedoch ein relativ schneller Rückgang der verflüssigenden Wirkung zu erwarten. Für eine längere Verflüssigungsdauer sind PCE mit niedriger Ladungsdichte geeignet, da sie schwächer sorbieren. Hierbei kann der Einfluss der Sulfationen auf die Sorption durch höhere Zugabemengen kompensiert werden.

## 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 kann die Rissicherheit von großflächigen Bauteilen, wie beispielsweise Bodenplatten, sowie Bauteilen aus hochfestem Beton im frühen Alter gefährdet sein. Schwinden wird durch Feuchtegehaltsänderungen im Beton verursacht, die durch umweltbedingte oder innere Austrocknung im Beton zu Veränderungen der inneren Kräfte im Gefüge der Zementsteinmatrix führen. Dabei entstehen Zugspannungen, die ein Zusammenziehen der Zementsteinmatrix bewirken.

Um das Schwinden von Beton zu vermindern, wurden in Japan Anfang der 1980er 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. In tragenden Bauteilen aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton werden sie bisher nicht verwendet, da eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für diese Zusatzmittelart derzeit noch nicht vorliegt.

Im Forschungsinstitut der Zementindustrie wurden Untersuchungen über die Wirkungsmechanismen schwindreduzierender Zusatzmittel in einem von der AiF geförderten Forschungsvorhaben durchgeführt. In einem ersten Schritt wurde ein umfassender Überblick über die derzeit am Markt verfügbaren Schwindreduzierer erarbeitet. Anhand von Literaturrecherchen in Kombination mit chemischen Analysemethoden konnten die Wirkstoffe der handelsüblichen Schwindreduzierer teilweise ermittelt werden. Insgesamt wurden fünf handelsübliche Schwindreduzierer und drei chemische Wirkstoffsubstanzen, die in handelsüblichen Produkten enthalten sein können, untersucht. Bei einer Lagerung im Klima 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte wiesen die untersuchten handelsüblichen Schwindreduzierer hygroskopische Eigenschaften auf. Bei praxisüblichen Verdünnungen (SRA-Gehalt = 5 M.-%) wurde keine hygroskopische Wirkung mehr beobachtet.

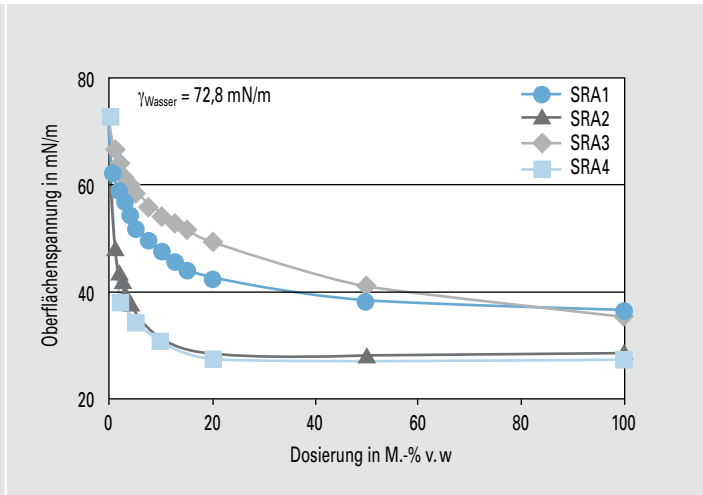
In der Literatur wird häufig die Oberflächenspannung als maßgebende Einflussgröße für eine Schwindreduzierung genannt. Bei den durchgeführten Versuchen

wurde durch die Verwendung der schwindreduzierenden Zusatzmittel sowohl die Oberflächenspannung des Zugabewassers als auch der Porenlösung anhaltend um bis zu 60 % herabgesetzt. Dabei ließen sich die verwendeten Schwindreduzierer und Wirkstoffe grob in zwei Gruppen einteilen, die die Oberflächenspannung in unterschiedlicher Größe herabsetzten. Eine Gruppe Schwindreduzierer (Gruppe 1) reduzierte die Oberflächenspannung bereits bei sehr geringen Dosierungen deutlich um bis zu 60 % und zeigte bei ca. 20 Vol.-% eine Art Sättigungspunkt. In eine weitere Gruppe (Gruppe 2) ließen sich Schwindreduzierer einordnen, bei denen die Reduzierung der Oberflächenspannung geringer ausfiel (ca. 45 %) und sich kein ausgeprägter Sättigungspunkt einstellte. In **Bild V-12** ist die Oberflächenspannung von vier untersuchten Schwindreduzieren bzw. Wirkstoffen in wässriger Lösung dargestellt. SRA2 und SRA4 repräsentieren dabei die Schwindreduzierer-Gruppe 1, SRA1 sowie SRA3 die Schwindreduzierer-Gruppe 2.

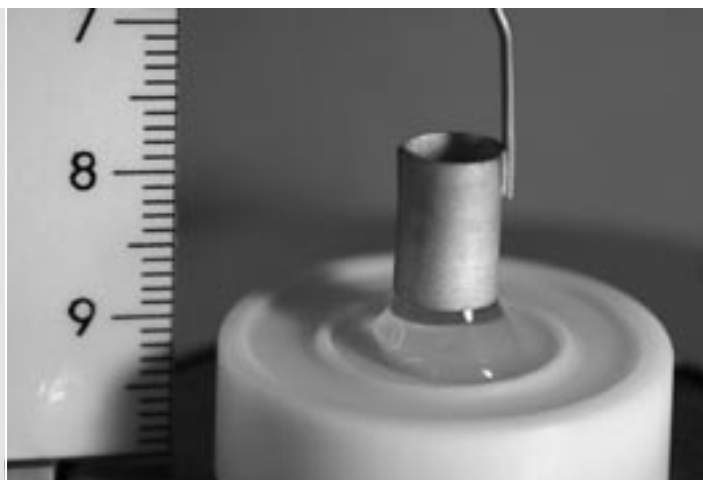
Zur Ermittlung des Einflusses von SRA auf die Eigenschaften der Porenlösung wurde Zementstein ausgepresst. Aufgrund der geringen Probemengen wurde die Oberflächenspannung der Porenlösung mit einer gebogenen Platte an Probenvolumina von jeweils 0,35 ml bestimmt. **Bild V-13** zeigt den Versuchsaufbau während der Messung. Die Oberflächenspannung wurde aus der zum Herausziehen der Platte notwendigen Kraft berechnet. Wie auch bei den wässrigen Lösungen verminderten die Schwindreduzierer die Oberflächenspannung der Porenlösung um bis zu 60 % bzw. 45 % (Gruppe 1 bzw. Gruppe 2). Der Gehalt an SRA in der Porenlösung stieg mit zunehmender Hydrationsdauer an. Dies konnte auf einen Verbrauch des Porenwassers während der Hydratation zurückgeführt werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Schwindreduzierer nicht in Hydratphasen eingebaut wurden. Die Alkaligehalte in der Porenlösung wurden durch die Verwendung von schwindreduzierenden Zusatzmitteln vermindert.

Die Konsistenz und der Luftgehalt von Zementleimen wurden durch schwindreduzierende Zusatzmittel nur geringfügig beeinflusst. Handelsübliche Schwindreduzierer reduzierten sowohl das autogene als auch das Trocknungsschwinden von Zementstein. Die Reduzierung des autogenen Schwindens von Zementstein mit verschiedenen Wasserzementwerten bezogen auf Referenzproben ohne Schwindreduzierer ist am Beispiel eines CEM I 42,5 R in **Bild V-14** dargestellt.

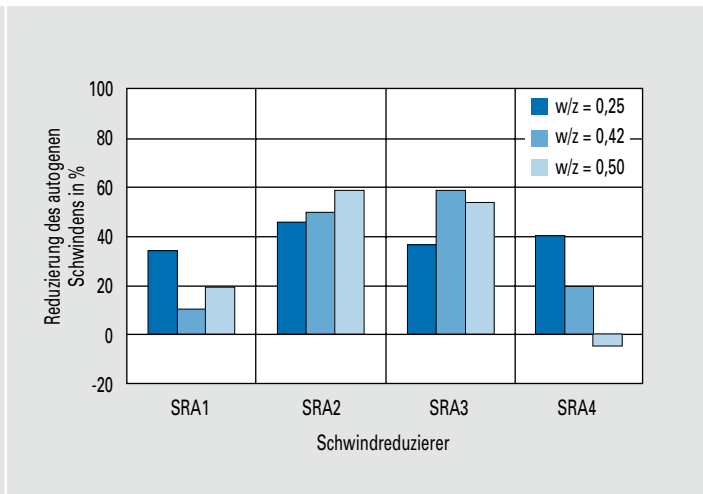
**Bild V-12:** Oberflächenspannung wässriger Lösungen mit unterschiedlichen Schwindreduzierergehalten



**Bild V-13:** Messung der Oberflächenspannung von Porenlösung in Anlehnung an die WILHELMY-Plattenmethode



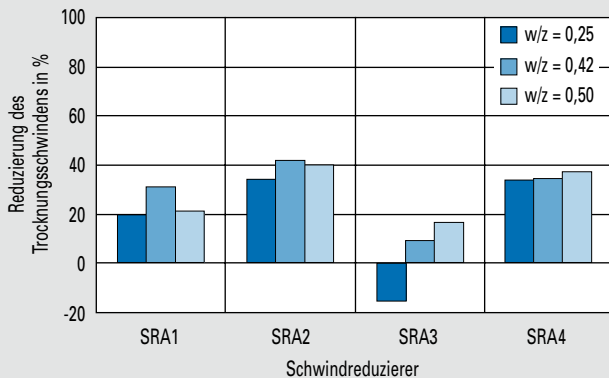
**Bild V-14:** Reduzierung des autogenen Schwindens im Alter von 91 Tagen bezogen auf Referenzproben ohne Schwindreduzierer; CEM I 42,5 R



Das autogene Schwinden ist insbesondere bei wasserarmen Zementsteinen von Bedeutung. Bei einem Wasserzementwert  $w/z = 0,25$  wurde das autogene Schwinden durch die verwendeten SRA und Wirkstoffe zwischen 34 % und 46 % bezogen auf die Referenzprobe ohne Schwindreduzierer abgemindert. Mit Zunahme des Wasserzementwerts auf  $w/z = 0,42$  und  $w/z = 0,50$  wurden z. T. erhebliche Unterschiede in der Wirkung der verschiedenen Schwindredu-

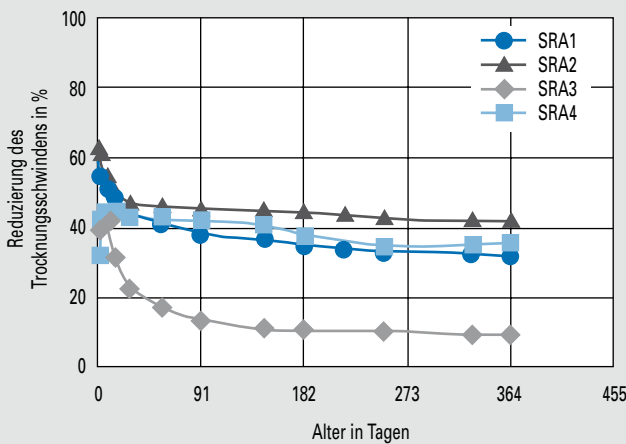
zierer bzw. Wirkstoffe ermittelt. Bei einem Wasserzementwert  $w/z = 0,50$  betragen die Schwindreduzierungen des autogenen Schwindens zwischen 59 % (SRA2) und -4 % (SRA4).

Das Trocknungsschwinden, das bei höheren Wasserzementwerten den größten Beitrag am Gesamtschwinden hat, wurde bei Wasserzementwerten von  $w/z = 0,42$  und  $w/z = 0,50$  durch die Verwendung



**Bild V-15:** Reduzierung des Trocknungsschwindens im Alter von 364 Tagen bezogen auf Referenzproben ohne Schwindreduzierer; CEM I 42,5 R

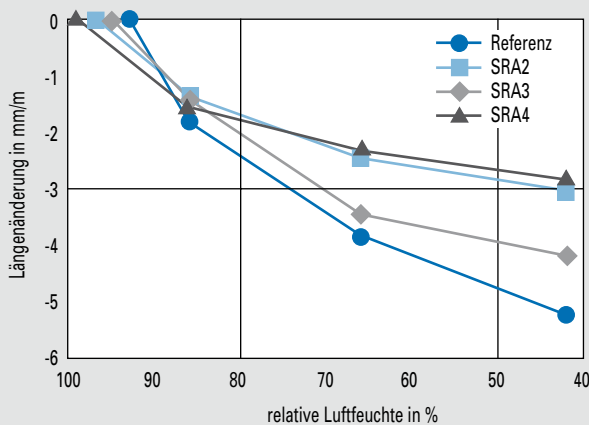
der handelsüblichen Schwindreduzierer weitgehend unabhängig von der Zementart abgemindert. Die Reduzierung des Trocknungsschwindens von Zementstein mit verschiedenen Wasserzementwerten ist am Beispiel eines CEM I 42,5 R in **Bild V-15** dargestellt. Ein deutlicher Einfluss des Wasserzementwerts auf die Schwindreduzierung ist bei Schwindreduzierer SRA1 und bei Wirkstoff SRA3 zu erkennen. Beide Zusatzmittel gehörten zur Schwindreduzierer-Gruppe 2. SRA2 und SRA4 reduzierten hingegen das Trocknungsschwinden bei den untersuchten Wasserzementwerten in vergleichbarer Weise und gehörten zur Schwindreduzierer-Gruppe 1. Die schwindreduzierende Wirkung ist von dem eingesetzten Schwindreduzierer bzw. Wirkstoff abhängig.



**Bild V-16:** Verlauf der schwindreduzierenden Wirkung im Normklima bezogen auf Referenzproben ohne Schwindreduzierer; CEM I 42,5 R; w/z = 0,42

Mit zunehmender Lagerungsdauer verringerte sich die Wirkung der Schwindreduzierer. In **Bild V-16** ist exemplarisch die Schwindreduzierung bei Zementsteinprismen eines CEM I 42,5 R bis zu einem Alter von 364 Tagen dargestellt.

Zusammenfassend ließ sich feststellen, dass das autogene Schwinden und das Trocknungsschwinden durch die handelsüblichen Produkte reduziert wurde, wobei zwischen den untersuchten Produkten teilweise sehr deutliche Unterschiede auftraten. In Einzelfällen führte die Verwendung der reinen Wirkstoffe zu größeren Schwindverformungen im Vergleich zu den Referenzproben ohne Schwindreduzierer.



**Bild V-17:** Schwinden von Zementsteinprismen bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten bei 20 °C; CEM I 42,5 R; w/z = 0,42

Neben Untersuchungen des autogenen Schwindens und des Trocknungsschwindens in konstantem Klima wurden Untersuchungen zum Schwinden von Zementstein unter wechselnden Lagerungsbedingungen durchgeführt. Hierzu erfolgten eine Wasser-Luft-Wechsel-Lagerung und eine Lagerung in unterschiedlichen relativen Luftfeuchten bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C. Bei der Wechsellagerung in Wasser und Luft (20/65) entsprach die Schwindreduzierung in etwa der bei Lagerung im konstanten Laborklima 20/65. Die Untersuchungen des Schwindens in unterschiedlichen relativen Luftfeuchten wurden am Schwindreduzierer SRA2 sowie den Wirkstoffen SRA3 und SRA4 durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass die Wirkungsweise der Schwindreduzierer und Wirkstoffe von der relativen Umgebungfeuchte abhängig war. **Bild V-17** zeigt, dass bei Erreichen der Ausgleichsfeuchte von 86 % r. F. das Schwinden der Zementsteinprismen durch die untersuchten Schwindreduzierer bzw. Wirkstoffe nur geringfügig gemindert wurde. Mit abnehmender rela-

tiver Luftfeuchte auf 66 bzw. 44 % wurde das Trocknungsschwinden durch SRA2 und SRA4 deutlich gemindert. Dagegen war die Schwindreduzierung durch SRA3 bei diesen relativen Umgebungsfeuchten sichtbar geringer. Diese Untersuchungen bestätigten die Annahme, dass die vergleichsweise geringe Schwindreduzierung des Wirkstoffs SRA3 im Normalklima (20/65) (Bild V-15) u. a. von der relativen Luftfeuchte abhängig war.

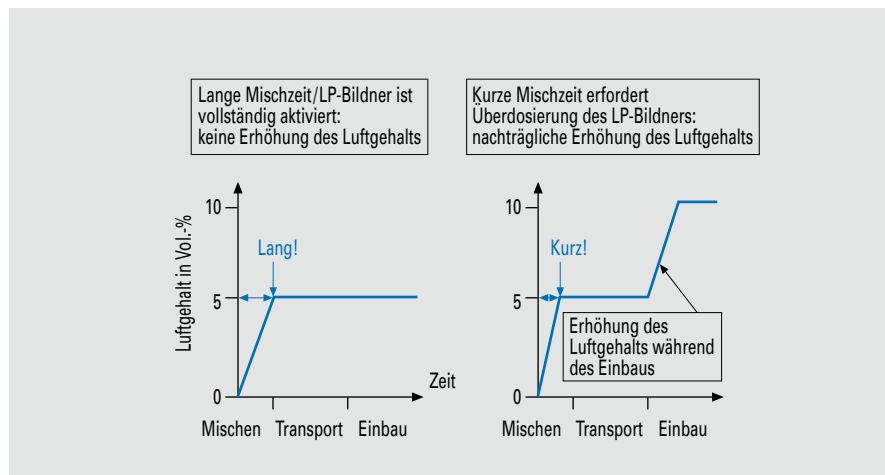
Sowohl unter konservierenden Lagerungsbedingungen als auch unter Trocknungsbedingungen wurde bei allen Zementsteinen eine Verfeinerung des Porensystems bei kaum veränderter Gesamtporosität festgestellt.

Je nach Lagerungsbedingungen kann sowohl die Oberflächenspannung der Porenlösung als auch die veränderte Porosität maßgebend für die Wirkung der Schwindreduzierer sein. Eine Wichtung der beiden Faktoren ist derzeit noch nicht möglich. Zementsteinproben, die Schwindreduzierer bzw. deren Wirkstoffe enthielten, wiesen keine wasserrückhaltenden Eigenschaften auf. Dagegen wurden gegenüber Referenzproben ohne SRA erhöhte Wasserabgaben von bis zu 25 % ermittelt.

Die Verfeinerung des Porensystems führte u. a. zu einer deutlich verminderten kapillaren Wasseraufnahme, jedoch nicht zu einer Erhöhung der Zementsteindruckfestigkeit. Warum trotz verminderter Kapillarporosität die Druckfestigkeit abfiel, insbesondere im Alter zwischen zwei und sieben Tagen, ist noch nicht abschließend geklärt. Kalorische Untersuchungen ergaben, dass bei praxisüblichen Dosierungen der Schwindreduzierer die Zementhydratation nur geringfügig verzögert wurde.

### 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 Anwendungsgebiete sind Brückenkappen, Räumlerlaufbahnen und inzwischen auch Betone im Wasserbau (Expositionsklasse XF3).



**Bild V-18:** Entwicklung des Luftgehalts von Straßenbeton in Abhängigkeit der Mischzeit und Dosierung von LP-Bildner

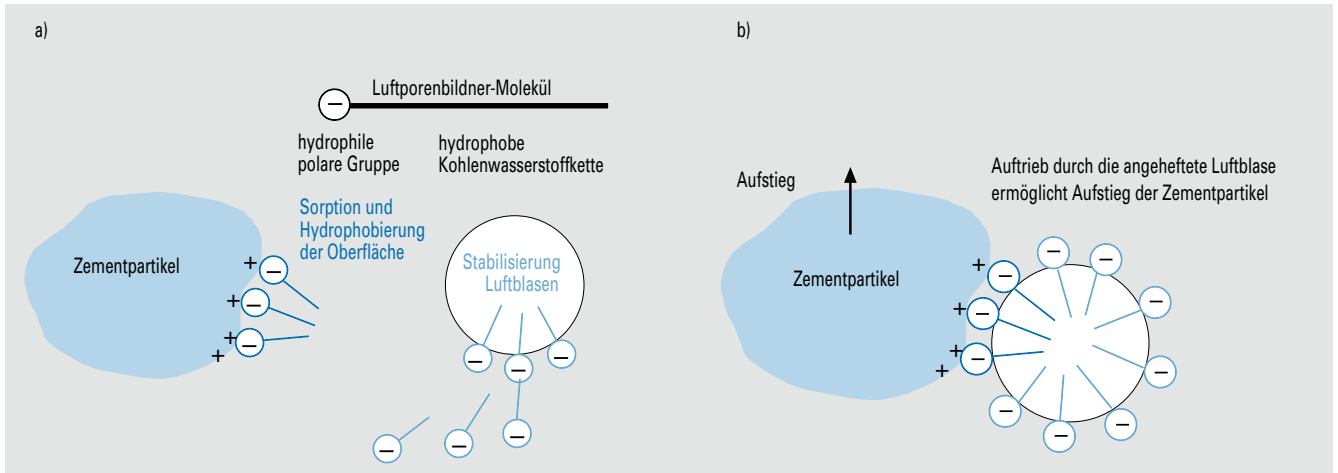


**Bild V-19:** Einbau mit dem Gleitschalungsfertiger: Eintrag von Mischenergie in den Frischbeton durch die Verteilerschnecke

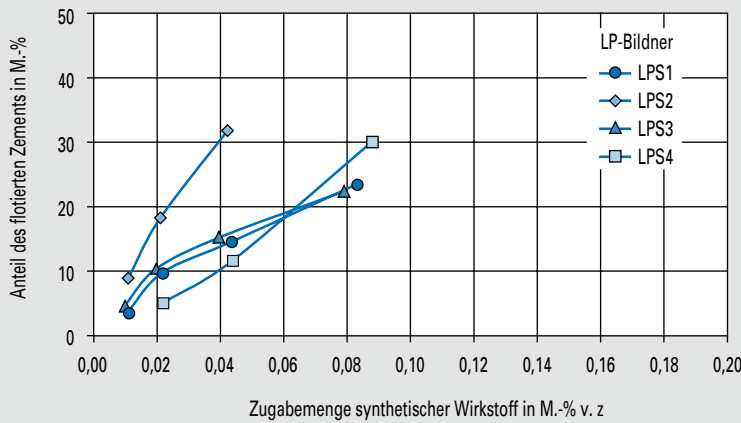
Luftporenbildner gehören zu den grenzflächenaktiven Substanzen, den so genannten Tensiden. Die gemeinsame Charakteristik der Tenside ist ihr hydrophob/hydrophiler Molekülaufbau. Sie bestehen aus einer unpolaren hydrophoben Kohlenwasserstoffkette und einer hydrophilen polaren Carboxyl-, Sulfat- oder Sulfonatgruppe.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

Die Herstellung eines sachgerechten Luftporenbetons setzt eine umfangreiche Eignungsprüfung voraus, bei der wesentliche Einflüsse auf die Luftporenbildung aus Betonzusammensetzung, Frischbetontemperatur und Mischdauer festgestellt werden. Entsprechende Regelungen für die Zusammensetzung und Herstellung von Luftporenbeton sind im Regelwerk

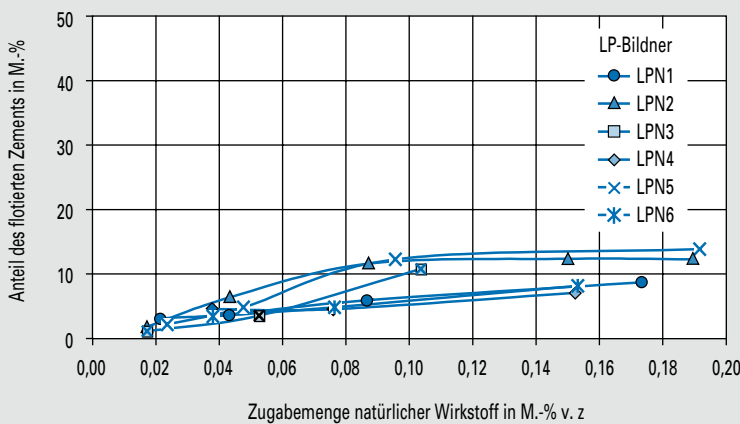
festgelegt und haben sich in der Vergangenheit bewährt. Dennoch wurde bei einigen Betondeckenlosen bei Verwendung von Luftporenbildnern mit synthetischer Wirkstoffbasis ein stark erhöhter Luftporengehalt im Festbeton festgestellt. Erste Untersuchungsergebnisse des Forschungsinstituts mit Straßenbetonen und handelsüblichen LP-Bildnern zeigten, dass eine wesentliche Erhöhung des Luftgehalts nur auftreten kann, wenn der LP-Bildner infolge einer zu kurzen Mischzeit überdosiert wurde, um den angestrebten Luftgehalt einzuhalten (Bild V-18). Der Frischbeton enthält dann nicht ausreichend aufgeschlossenen und aktivierten LP-Bildner. Bei einem nachträglichen Eintrag von Mischenergie in den Frischbeton, z. B. während des Einbaus durch die Verteilerschnecke des Fertigers, kann sich der Luftgehalt erhöhen (Bild V-19). Gegebenenfalls sind die Festigkeits- und Dauerhaftigkeitseigenschaften des erhärteten Betons gefährdet.



**Bild V-20: Flotation von Zement mit einem Luftporenbildner; a) Stabilisierung von Luftblasen und Sorption von Luftporenbildner; b) Anheftung von Luftblasen ermöglicht Aufstieg der Zementpartikel**



**Bild V-21: Anteil des florierten Zements in Abhängigkeit von der Zugabemenge des Wirkstoffs der LP-Bildner mit synthetischer Wirkstoffbasis**



**Bild V-22: Anteil des florierten Zements in Abhängigkeit von der Zugabemenge des Wirkstoffs der LP-Bildner mit natürlicher Wirkstoffbasis**

Da die genauen Wechselwirkungen zwischen Luftporenbildendem Wirkstoff, Mischzeit und Zugabemenge nicht hinreichend bekannt waren, wurde im Berichtszeitraum im FIZ ein von der AiF gefördertes Forschungsvorhaben bearbeitet. Dabei wurde die Luftporenbildung an Mörteln und Zementssuspensionen und das Sorptionsverhalten mit Flotationsversuchen und an Zementleimen untersucht.

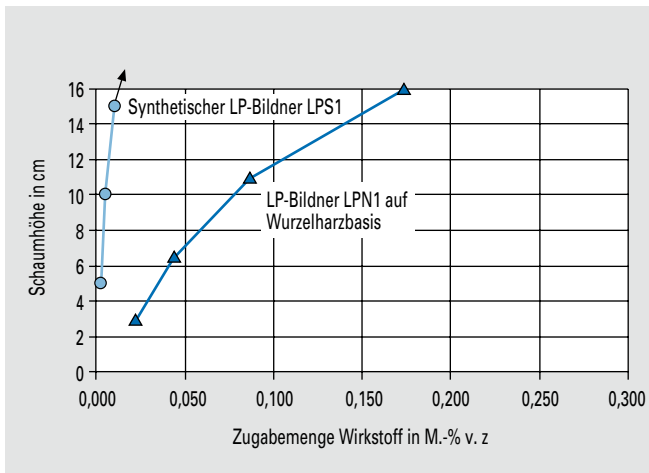
**Luftporenbildung im Mörtel**

Die Luftporenbildung wurde in Abhängigkeit von der Wirkstoffart und der Zugabemenge des Zusatzmittels und der Mischzeit bestimmt. Insgesamt wurden sechs LP-Bildner (drei mit natürlicher und drei mit synthetischer Wirkstoffbasis) und sechs Wirkstoffe (zwei mit natürlicher und vier mit synthetischer Wirkstoffbasis) eingesetzt. In einem Vorversuch wurde die Zugabemenge von LP-Bildner bzw. Wirkstoff so festgelegt, dass bei einer Mischzeit von zwei Minuten ein Luftgehalt von  $5,0 \pm 0,5$  Vol.-% erzielt wurde. Anschließend wurde die mischzeitabhängige Luftporenbildung mit dieser Zugabemenge sowie der doppelten und der dreifachen Zugabemenge ermittelt. Bei den Mitteln mit natürlicher Wirkstoffbasis stieg der Luftgehalt bei Verdreifachung der Zugabemenge von 5 Vol.-% auf maximal rund 10 Vol.-% an. Bei den synthetischen Tensiden war ein stärkerer Anstieg bei dreifacher Zugabemenge von 5 Vol.-% auf mindestens 15 Vol.-%, teilweise bis zu 35 Vol.-% zu verzeichnen.

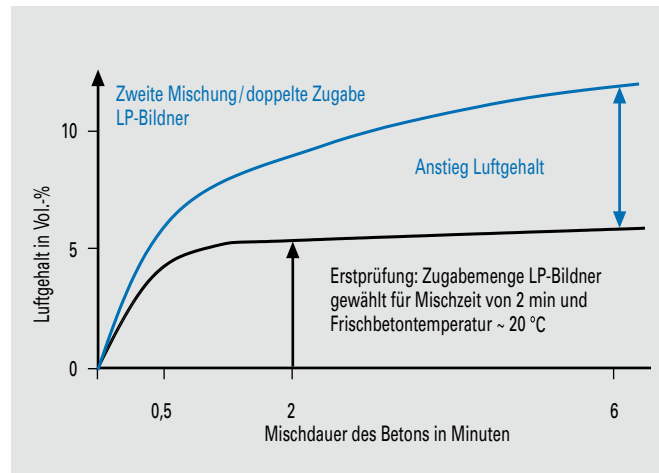
**Flotation und Schaumbildung**

In Flotationsversuchen wurde die Wirkungsweise der LP-Bildner weiter untersucht. In einem Behälter wurden Wasser,





**Bild V-23: Schaumbildung in einer Zementsuspension in Abhängigkeit der Zugabemengen (Wirkstoff) der LP-Bildner LPS1 und LPN1**



**Bild V-24: Zusätzliche Versuche im Rahmen der Erstprüfung mit normaler und doppelter Zugabemenge des LP-Bildners und verlängerter Mischdauer. Ziel: Prognose der Gefahr einer nachträglichen Erhöhung des Luftgehalts infolge Überdosierung und verkürzter Mischdauer**

Zement und Zusatzmittel gemischt und feine Luftblasen in die Suspension eingebracht. Die Zusatzmittelmoleküle lagern sich dabei um Luftblasen herum an bzw. werden mit der negativ geladenen polaren Gruppe des Moleküls an positiv geladene Teilbereiche der Zementpartikel sorbiert (**Bild V-20 a**). Dadurch können sich Luftblasen an die Zementpartikel anheften (**Bild V-20 b**) und gemeinsam bis an die Oberfläche aufsteigen. Der entstehende Schaum wurde über einen konstanten Zeitraum abgeschöpft. Nach Trocknung des Schaums wurde der Anteil des an der Oberfläche abgeschöpften (flotierten) Zements bestimmt. Das Sorptionsverhalten der Luftporenbildner-Moleküle und deren Fähigkeit zur Luftblasenstabilisierung beeinflussen die Menge des im Flotationsversuch gewonnenen Zements. Bei einer starken Schaumbildung in Verbindung mit einer guten Sorptionsfähigkeit können sich viele Luftblasen an Zementpartikel anheften und den Anteil des zur Oberfläche aufgestiegenen Zements erhöhen. Dieser Anteil stieg bei den LP-Bildnern mit synthetischer Wirkstoffbasis (**Bild V-21**) mit zunehmender LP-Bildner-Zugabemenge deutlich auf rund 30 M.-% an. Bei den LP-Bildnern mit natürlicher Wirkstoffbasis (**Bild V-22**) war nur ein sehr geringer Anstieg bis auf einen Anteil von rund 15 M.-% zu verzeichnen. Dieser Zusammenhang wurde auch für die Wirkstoffe festgestellt.

Darüber hinaus wurde das Schaumbildungsvermögen an Zementsuspensionen in Abhängigkeit der Art und Zugabemenge des LP-Bildners bzw. Wirkstoffs bestimmt. Dabei wurden in einem Standzylinder Wasser, Zement und Zusatzmittel gemischt,

feine Luftblasen in die Suspension eingebracht und die Höhe des entstehenden Schaums gemessen. **Bild V-23** zeigt beispielhaft die Schaumbildung in Abhängigkeit der Wirkstoff-Zugabemenge des synthetischen LP-Bildners LPS1 und des natürlichen LP-Bildners LPN1 (Wurzelharz). Bei gleicher Wirkstoffkonzentration weist der LP-Bildner LPS1 mit synthetischer Wirkstoffbasis eine wesentlich stärkere Schaumbildung auf als der LP-Bildner LPN1 mit natürlicher Wirkstoffbasis. Beim synthetischen LP-Bildner können bereits sehr geringe Änderungen in der zugegebenen Wirkstoffmenge große Unterschiede in der Schaumbildung hervorrufen. Beim LP-Bildner LPN1 fällt die Veränderung wesentlich geringer aus.

#### Sorptionsverhalten

Um Informationen über das Sorptionsverhalten der Zusatzmittel zu erhalten, wurde Zementleim ( $w/z$ -Wert = 1) mit LP-Bildner bzw. Wirkstoff in unterschiedlichen Zugabemengen dotiert und abfiltriert. Die Menge des am Zement sorbierten Zusatzmittels wurde aus den TOC-Gehalten der abfiltrierten Lösungen mit und ohne Zugabe des Zusatzmittels bestimmt. Im Sorptionsverhalten wurde kein Unterschied zwischen Zusatzmitteln mit natürlicher bzw. synthetischer Wirkstoffbasis festgestellt.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass eine nachträgliche Erhöhung des Luftgehalts bei einer Überdosierung des LP-Bildners infolge verkürzter Mischdauer nur bei LP-Bildnern mit synthetischer Wirkstoffbasis zu erwarten ist. Ursache hierfür ist bei nahezu identischem Sorptionsverhalten die Molekülstruktur der synthetischen Wirkstoffe, die eine Schaumbildung erleichtert.

Ob eine nachträgliche Erhöhung des Luftgehalts zu erwarten ist, kann mit einem Zusatzversuch frühzeitig bereits im Rahmen der Erstprüfung überprüft werden (**Bild V-24**). Dabei muss die in der Erstprüfung ermittelte Luftporenbildner-Zugabemenge verdoppelt und der Luftgehalt der Mischungen mit beiden LP-Bildner-Zugabemengen nach einer kurzen Mischdauer von z. B. 30 Sekunden und nach einer verlängerten Mischdauer von sechs Minuten bestimmt werden. Bei einem wesentlichen Anstieg des Luftgehalts bei doppelter Zugabemenge und verlängerter Mischdauer besteht bei der Bauausführung die Gefahr einer nachträglichen Erhöhung des Luftgehalts.

#### Arbeitsgruppe Luftporenbeton

Aus der Praxis wurde über Probleme bei der Herstellung von Luftporenbeton bei Betonen mit weicher Konsistenz insbesondere bei der Verwendung von Fließmitteln auf der Basis von Polycarboxylatethern (PCE) berichtet. Danach ist das Luftporengefüge in einigen Fällen nicht stabil, wobei sich der Luftgehalt insgesamt und die Luftporenverteilung verändern können. Vereinzelt wurden trotz Einhaltung des Gesamtluftgehalts im Frischbeton die am Festbeton ermittelten Anforderungen an die Luftporenkennwerte (Abstandsfaktor und Mikroluftporengehalt) nicht eingehalten. Die zielsichere Einstellung des Mikroluftporengefüges, das Frost- und Frost-Tausalz-Schäden verhindert, ist in diesem Fall nicht mehr gewährleistet. Der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) hat zur Aufklärung des Sachverhalts 2006 eine Arbeitsgruppe unter Leitung des Forschungsinstituts ins Leben gerufen.

## Alkali-Kieselsäure-Reaktion ■

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

In Deutschland wird zur Vermeidung von Schäden in Betonkonstruktionen durch eine AKR die Alkali-Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) angewendet. Im Berichtszeitraum konzentrierten sich die Tätigkeiten im Forschungsinstitut auf die Untersuchung von Prüfverfahren, die für die Überarbeitung der Alkali-Richtlinie von Bedeutung sind. Dazu gehörten Prüfungen zur Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen (Mörtelschnelltests und Betonversuche). Zusätzlich wurden Prüfverfahren entwickelt, mit denen die Alkaliempfindlichkeit von Betonzusammensetzungen bewertet werden kann. Dem Einfluss einer Alkalizufuhr von außen durch Taumittel, die bei Fahrbahndecken und Flugverkehrsflächen aus Beton eingesetzt werden, wurde nachgegangen. Weiterhin wurde der Einfluss der Porenlösungszusammensetzung auf eine schädigende AKR untersucht. Zur Diagnose von geschädigten Bauwerksbetonen und zur Feststellung möglicher Korrelationen zwischen Dehnungen und Gefügeschädigungen kamen in

vielen Fällen Dünnschliffuntersuchungen zur Anwendung.

### Allgemeine Rundschreiben Straßenbau

In den vergangenen Jahren sind vereinzelt Schäden an Betonfahrbahndecken aufgetreten, die auf reaktive Gesteinskörnungen zurückgeführt werden konnten. Diesen Gesteinskörnungen wurde bisher in der Alkali-Richtlinie keine Rechnung getragen, sodass keine Maßnahmen zur Vermeidung einer schädigenden AKR anzuwenden waren. Auf Veranlassung der Industrie wurden vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) die Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau Nr. 15/2005 und Nr. 12/2006 herausgegeben. Sie legen fest, dass für Betonfahrbahndecken die Alkaliempfindlichkeit einiger gebrochener Gesteinskörnungen von hierfür anerkannten Prüfstellen begutachtet werden muss. Weiterhin wurde der Alkaligehalt der Fahrbahndeckenzemente weiter begrenzt (z. B. für einen CEM I von 1,00 M.-%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Äqu.}}$  auf 0,80 M.-%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Äqu.}}$ ). Die Forderungen der Rundschreiben wurden in die Alkali-Richtlinie übernommen, die zu Beginn des Jahres 2007 erschienen ist.

### Alkali-Richtlinie

In Deutschland werden technische Regeln für Bauprodukte und Bauarten durch die Bauregelliste bekannt gegeben. Nach Bauregelliste ist bei natürlichen Gesteinskörnungen für tragende Bauteile im Ü-Zeichen als wesentliches Merkmal die Alkaliempfindlichkeitsklasse entsprechend Alkali-Richtlinie anzugeben (vgl. Bauregelliste A Teil 1). Damit müssen alle Gesteinskörnungen in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse entsprechend der Alkali-Richtlinie

eingestuft werden. Sofern nicht die Alkaliempfindlichkeitsklasse E III erklärt wird, ist eine Zertifizierung und Überwachung nach Alkali-Richtlinie erforderlich.

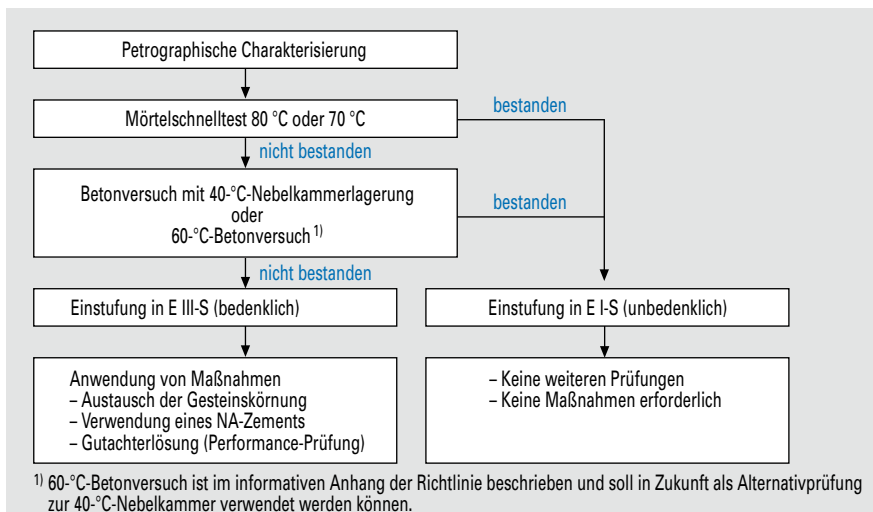
Bei allen in Teil 1 der Richtlinie genannten Gesteinskörnungen muss die Einstufung durch eine entsprechende Prüfung nach Teil 2 oder Teil 3 erfolgen. Nicht genannte Gesteinskörnungen können auf der Grundlage einer petrographischen Beschreibung nach DIN EN 932-3 ohne eine weitere Prüfung in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E I („unbedenklich“) eingestuft werden, wenn folgende drei Bedingungen erfüllt werden:

- Die Gesteinskörnung wurde nicht in den in der Richtlinie genannten Gebieten gewonnen.
- Die Gesteinskörnung enthält keine der in der Richtlinie genannten Gesteinskörnungen.
- Mit der Gesteinskörnung ist unter baupraktischen Bedingungen keine schädigende AKR aufgetreten.

Teil 1 der Richtlinie schreibt die bisherigen Regelungen für Gesteinskörnungen mit Opalsandstein, Kieselkreide und Flint unverändert wie bisher fort. Diese Gesteinskörnungen werden weiterhin nach Teil 2 geprüft, der nahezu unverändert blieb.

Neu aufgenommen in Teil 1 wurden weitere Gesteinskörnungen, die nach Teil 3 geprüft werden müssen. Dieses sind in Anlehnung an die Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau Nr. 15/2005 und Nr. 12/2006 Gesteinskörnungen aus gebrochener Grauwacke, gebrochenem Quarzporphyr (Rhyolith), gebrochenem Kies des Oberrheins und rezyklierten Gesteinskörnungen. Außerdem müssen Kiese untersucht werden, wenn sie mehr als 10 M.-% gebrochene Anteile der zuvor aufgeführten Gesteinskörnungen enthalten. Gebrochene Gesteinskörnungen, mit denen im Geltungsbereich der Alkali-Richtlinie keine baupraktischen Erfahrungen vorliegen, sind ebenfalls nach Teil 3 zu prüfen.

In den Teil 3 wurden Mörtelschnelltests und eine eigene Beanspruchungsklasse für Fahrbahndecken aus Beton aufgenommen. Darüber hinaus kann die Eignung spezieller Betonzusammensetzungen durch einen Gutachter beurteilt werden. In Anlehnung an das international übliche Vorgehen wurde ein Prüfschema (**Bild V-25**) zur Bewertung der Reaktivität von Gesteinskörnungen entwickelt. Nach der obligatorischen petrographischen Untersuchung der Gesteinskörnung wird im Rahmen einer



**Bild V-25: Ablaufschema der Gesteinskörnungsprüfung in Anlehnung an Teil 3 der Alkali-Richtlinie**

Erstprüfung an drei Proben je Lieferkörnung ein Mörtelschnelltest (80-°C- oder 70-°C-Mörtelschnelltest) durchgeführt. Eine solche Prüfung erlaubt eine schnelle Beurteilung. Die Proben sind im Abstand von etwa vier Wochen zu entnehmen.

Besteht die Gesteinskörnung den Mörtelschnelltest, dann ist sie alkaliunempfindlich und wird in E I-S eingestuft. Es sind dann keine weiteren Prüfungen und auch keine Maßnahmen nach **Tafel V-2** erforderlich. Wird der Mörtelschnelltest nicht bestanden, so kann keine Aussage zur Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung gemacht werden und es ist ein Betonversuch mit der 40-°C-Nebelkammerlagerung anzuschließen. Der Nachteil dieses Verfahrens ist die lange Dauer von neun Monaten. Im informativen Anhang der Richtlinie wird nun der so genannte 60-°C-Betonversuch beschrieben, mit dem eine Beurteilung bereits nach drei Monaten möglich ist. Für eine schnellere Prüfung von Gesteinskörnungen in Betonversuchen wird angestrebt, in Zukunft zusätzlich diesen 60-°C-Betonversuch als Alternativverfahren zur 40-°C-Nebelkammerlagerung einzusetzen zu können. Besteht die Gesteinskörnung den Betonversuch, sind wiederum keine weiteren Prüfungen oder Maßnahmen erforderlich, auch nicht bei einer Alkalizufuhr von außen. Wird der Betonversuch nicht bestanden, sind die im Teil 3 der Richtlinie genannten Maßnahmen zu ergreifen (Tafel V-2).

Neben den bestehenden Maßnahmen (Austausch der Gesteinskörnung, Verwendung eines NA-Zements) gibt es die Möglichkeit, die Eignung einer Betonzusammensetzung durch einen Gutachter beurteilen zu lassen. Aufgrund der besonderen Belastung von Fahrbahndecken aus Beton wurde außerdem eine neue Feuchtigkeitsklasse WS eingeführt. Sie berücksichtigt die Einwirkung von Alkalien durch Tausalze und die hohe dynamische Belastung. Sie gilt aufgrund der auf Flughäfen eingesetzten Auftaumittel jedoch nicht für Flugbetriebsflächen.

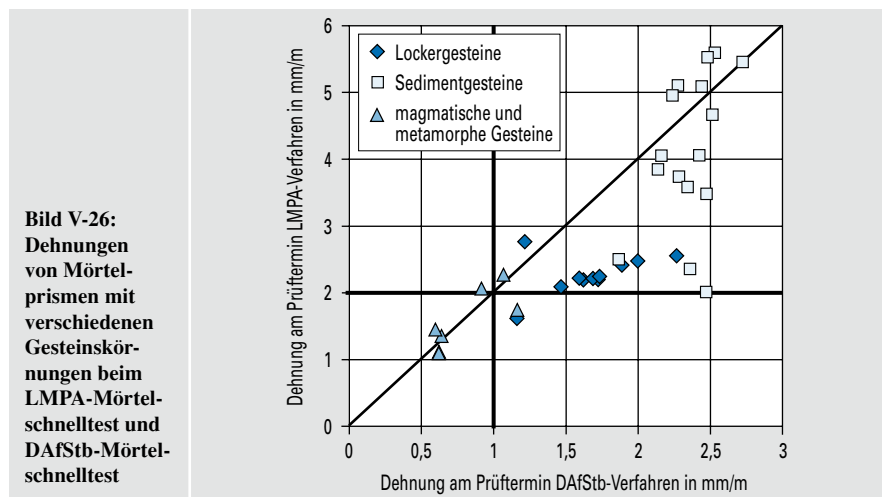
**Gesteinskörnungsprüfung – Mörtelschnelltests**

Schnellprüfverfahren haben den Vorteil, dass Gesteinskörnungen innerhalb kurzer Zeit beurteilt werden können. Nachteilig ist jedoch, dass manche Gesteinskörnungen zu scharf beurteilt und dann ggf. zu Unrecht von der Verwendung ausgeschlossen werden. In Deutschland stehen derzeit zwei Verfahren zur Verfügung, der 80-°C- und der 70-°C-Mörtelschnelltest. Beide Verfahren wurden in die Alkali-Richtlinie des DAFStb aufgenommen. Der

**Tafel V-25: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton bei Verwendung von Gesteinskörnungen nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie**

Alkaliempfindlichkeitsklasse	Zementgehalt in kg/m <sup>3</sup>	Erforderliche Maßnahmen für die Feuchtigkeitsklasse			
		WO	WF	WA	WS
E I-S	ohne Festlegung	keine	keine	keine	Straßenbauzemente <sup>4)</sup>
E III-S <sup>1)</sup>	z ≤ 300	keine	keine	keine	Straßenbauzemente <sup>4)</sup>
	300 < z ≤ 350	keine	keine	Performance-Prüfung <sup>2)</sup> oder NA-Zement	Straßenbauzemente <sup>4)</sup> sowie Austausch der Gesteinskörnung oder Gutachten <sup>3)</sup>
	z > 350	keine	Performance-Prüfung <sup>2)</sup> oder NA-Zement	Performance-Prüfung <sup>2)</sup> oder Austausch der Gesteinskörnung	Straßenbauzemente <sup>4)</sup> sowie Austausch der Gesteinskörnung oder Gutachten <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Gilt auch für nicht beurteilte Gesteinskörnungen.  
<sup>2)</sup> Die Performance-Prüfung wird in einem zukünftigen Teil 4 der Richtlinie beschrieben werden. Bis auf Weiteres erfolgt die Festlegung von vorbeugenden Maßnahmen auf Grundlage eines Gutachtens<sup>3)</sup>.  
<sup>3)</sup> Für die Erstellung von Gutachten sind sachkundige Fachgutachter einzuschalten.  
<sup>4)</sup> Siehe Tafel V-4 im Abschnitt Verkehrswegebau



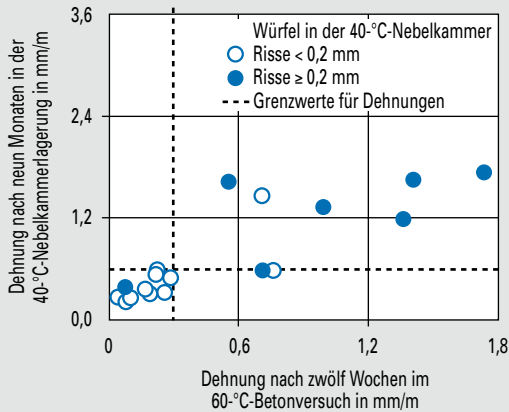
**Bild V-26: Dehnungen von Mörtelprismen mit verschiedenen Gesteinskörnungen beim LMPA-Mörtelschnelltest und DAFStb-Mörtelschnelltest**

80-°C-Mörtelschnelltest (DAFStb-Mörtelschnelltest des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton) wurde als Referenzverfahren und der 70-°C-Mörtelschnelltest (LMPA-Mörtelschnelltest, entwickelt an der Landesmaterialprüfanstalt Magdeburg) als Alternativverfahren festgelegt.

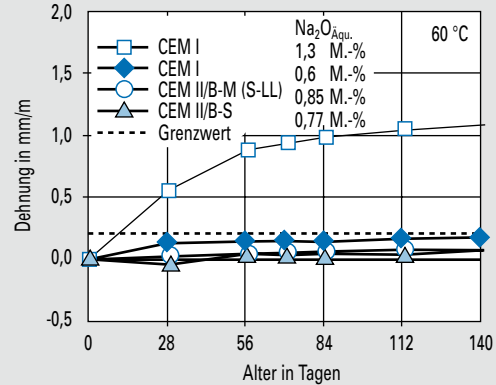
Beim DAFStb-Mörtelschnelltest wird die Gesteinskörnung auf eine Korngröße von 0,125 bis 4 mm zerkleinert. Aus dem zerkleinerten Material werden drei Mörtelprismen hergestellt. Die Dehnung der Prismen wird nach einer 13-tägigen Lagerung in 80 °C heißer, einmolarer NaOH-Lösung bestimmt. Der Grenzwert für die Dehnung der Mörtelprismen beträgt 1,0 mm/m.

Im LMPA-Mörtelschnelltest wird die Gesteinskörnung auf eine Korngröße von 0,5

bis 2 mm zerkleinert. Für die Herstellung des Mörtels wird der Alkaligehalt mit einer NaOH-Lösung auf ein Na<sub>2</sub>O-Äquivalent von 2,5 M.-% bezogen auf den Zement angehoben. Es werden drei Mörtelprismen hergestellt, die 28 Tage bei 70 °C über einem Wasserbad in geschlossenen Behältern gelagert werden. Der Grenzwert für die Dehnung liegt bei 1,5 mm/m. Die Dehnungsmessungen werden bei 20 °C durchgeführt. Ursprünglich erfolgten die Messungen bei 70 °C. Hierbei lag der Grenzwert bei 2,0 mm/m nach 21 Tagen. Um den Einfluss der thermischen Dehnung (ungefähr 0,5 mm/m bei 50 K Temperaturdifferenz) auszuschließen, wurde das Verfahren dahingehend geändert, dass die Längenänderungsmessung bei 20 °C durchgeführt wird.



**Bild V-27:** Dehnungen von Betonbalken mit verschiedenen Gesteinskörnungen in der 40°C-Nebelkammer ( $z = 400 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,45$ ,  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Aq.}} = 1,3 \text{ M.-%}$ ) und im 60°C-Betonversuch ( $z = 400 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,45$ ,  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Aq.}} = 1,3 \text{ M.-%}$ ) bzw. RILEM AAR-4 ( $z = 440 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,50$ ,  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Aq.}} = 1,26 \text{ M.-%}$ ) sowie Risse  $\geq 0,2 \text{ mm}$  (blauer Punkt) und Risse  $< 0,2 \text{ mm}$  (weißer Punkt) im 30-cm-Würfel in der 40°C-Nebelkammer



**Bild V-28:** Dehnung von Betonen mit verschiedenen Zementen und mit unterschiedlichen Gesamtalkaligehalten ( $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Aq.}}$ ) im 60°C-Betonversuch mit 70 % Splitt Oberrhein,  $z = 400 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,45$

Im Berichtszeitraum wurden im Forschungsinstitut beide Schnellprüfverfahren etabliert und miteinander verglichen. Verschiedene Fraktionen von 16 unterschiedlichen Gesteinskörnungen wurden mit beiden Verfahren untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass eine strenge Korrelation der Ergebnisse beider Methoden nicht gegeben ist. Allerdings kommen beide Verfahren in den meisten Fällen zur selben Einstufung hinsichtlich der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung (Bild V-26). Nur in drei Fällen führten die beiden Methoden zu unterschiedlichen Einstufungen. Tendenziell ist der DAfStb-Mörtelschnelltest etwas schärfer als der LMPA-Mörtelschnelltest.

### Gesteinskörnungsprüfung – Betonversuche

In Deutschland konnte die Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen bisher nur mit der 40°C-Nebelkammerlagerung beurteilt werden. Zukünftig soll für eine schnellere Prüfung der 60°C-Betonversuch als Alternativverfahren eingesetzt werden können. Bei diesem Verfahren lagern drei Betonbalken über einem Wasserbad in einem dicht verschlossenen Edelstahlbehälter, der in einer Prüftruhe bei 60 °C und mindestens 98 % r. F. steht. Der 60°C-Betonversuch unterscheidet sich von der 40°C-Nebelkammerlagerung durch das Temperaturniveau und die Lagerbedingungen.

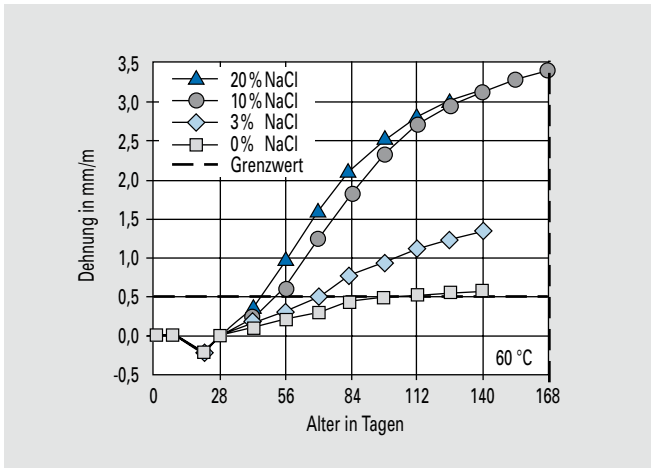
Im Forschungsinstitut wurden im Rahmen eines von der AiF geförderten Forschungsprojekts Vergleichsuntersuchungen mit beiden Verfahren durchgeführt. Sie belegen die Eignung des 60°C-Betonversuchs für

eine schnelle Beurteilung. Bild V-27 zeigt die Ergebnisse von Gesteinskörnungsprüfungen nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie in der 40°C-Nebelkammer und im 60°C-Betonversuch. Dargestellt sind die Dehnungen nach neun Monaten Nebelkammerlagerung und nach zwölf Wochen im 60°C-Betonversuch. Traten während der 40°C-Nebelkammerlagerung Risse  $\geq 0,2 \text{ mm}$  im 30-cm-Würfel auf, so ist der Punkt im Diagramm schwarz gekennzeichnet. Die Gesteinskörnung gilt bei der 40°C-Nebelkammerlagerung als unbedenklich, wenn die Dehnung der Balken 0,6 mm/m nicht überschreitet und die maximale Rissweite des Würfels unter 0,2 mm liegt. Für den 60°C-Betonversuch wird zurzeit in Anlehnung an internationale Erfahrungen (RILEM) ein Grenzwert von 0,3 mm/m nach zwölf Wochen angenommen. Von 18 untersuchten und hier dargestellten Gesteinskörnungen wurden lediglich zwei Gesteinskörnungen unterschiedlich eingestuft. Untersuchungen im Rahmen des europäischen PARTNER-Projekts bestätigen ebenfalls, dass sich der 60°C-Betonversuch zur Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen eignet. Dort wurden 16 Gesteinskörnungen mit dem 60°C-Betonversuch und mit anderen, regional üblichen Bewertungsmethoden untersucht. 14 Gesteinskörnungen wurden mit dem 60°C-Betonversuch im Vergleich zu den baupraktischen Erfahrungen richtig eingestuft. Bei zwei Gesteinskörnungen, die aus stark variierenden Lagerstätten stammen, war eine eindeutige Einstufung nicht möglich. Das Prüfverfahren hat den Vorteil, dass insbesondere langsam reagierende Gesteinskörnungen identifiziert werden.

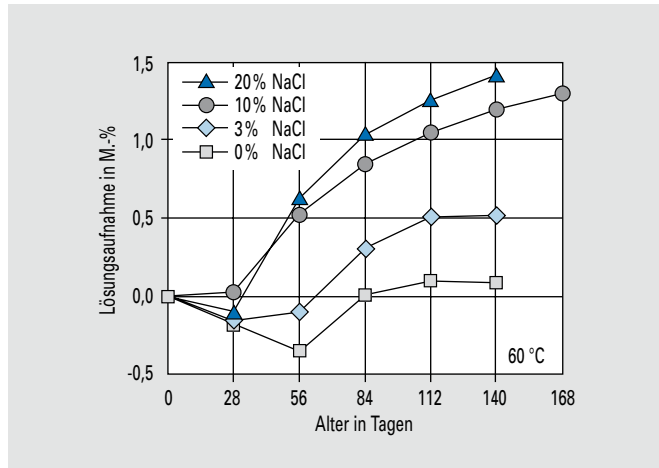
### Performance-Prüfung

Die Alkali-Richtlinie fordert bei reaktiven Gesteinskörnungen (E III) Maßnahmen in Abhängigkeit von der Feuchtigkeitsklasse des Bauteils und des Zementgehalts. Dieses sind bisher der Austausch der Gesteinskörnung oder der Einsatz von Zementen mit einem niedrigen wirksamen Alkaligehalt (NA-Zement). Um nicht unnötig Gesteinskörnungen oder Zemente von der Verwendung auszuschließen und ggf. auch eine Alkalizufuhr von außen durch Taumittel bei Betonen für Betonfahrbahndecken simulieren zu können, sind Performance-Prüfungen unerlässlich. Performance-Prüfungen sollen Auskunft geben, ob eine Betonzusammensetzung mit vorgegebener Gesteinskörnung und vorgegebenem Zement für eine bestimmte Feuchtigkeitsklasse eingesetzt werden kann. Im Forschungsinstitut wird hierfür der 60°C-Betonversuch in Anlehnung an Erfahrungen in Frankreich und der Schweiz eingesetzt. Das Verfahren soll in einen zukünftigen Teil 4 der Alkali-Richtlinie aufgenommen werden. Als Grenzwert wird bisher 0,2 mm/m vorgeschlagen.

Bild V-28 zeigt die Dehnung von Betonen, die mit einer reaktiven Gesteinskörnung (Splitt vom Oberrhein) und unterschiedlichen Zementen bei einem Zementgehalt von  $400 \text{ kg/m}^3$  und einem  $w/z$ -Wert von 0,45 hergestellt wurden. Die Verwendung eines CEM II/B-S bzw. eines CEM II/B-M (S-LL) führte zu ebenso guten Ergebnissen wie der NA-Portlandzement. Die Dehnungen liegen jeweils unter dem Grenzwert von 0,2 mm/m. Die verwendete reaktive Gesteinskörnung kann



**Bild V-29:** Dehnung eines Betons im 60-°C-Betonversuch als Performance-Prüfung bei 60 °C ohne und mit Alkalizufuhr (0%ige, 3%ige, 10%ige und 20%ige NaCl-Lösung), 70 % Splitt Oberrhein,  $z = 400 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z\text{-Wert} = 0,45$ , CEM I 32,5 R mit  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Aqu.}} = 1,29 \text{ M.-%}$



**Bild V-30:** Lösungsaufnahme bezogen auf das Gewicht nach dem Ausschalen eines Betons im 60-°C-Betonversuch als Performance-Prüfung bei 60 °C ohne und mit Alkalizufuhr (0%ige, 3%ige, 10%ige und 20%ige NaCl-Lösung), 70 % Splitt Oberrhein,  $z = 400 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z\text{-Wert} = 0,45$ , CEM I 32,5 R mit  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Aqu.}} = 1,29 \text{ M.-%}$

mit den eingesetzten Zementen CEM I-NA, CEM II/B-S oder CEM II/B-M (S-LL) bedenkenlos z. B. für Beton in feuchter Umgebung eingesetzt werden. Das bestätigen die Ergebnisse eines vergleichbaren Betons, der mit einem CEM II/B-S hergestellt wurde und seit sieben Jahren ohne Anzeichen auf eine schädigende AKR im Außenlager des Forschungsinstituts lagert.

**Alkalizufuhr von außen**

Vereinzelte AKR-Schäden an Fahrbahndecken aus Beton lassen vermuten, dass eine Alkalizufuhr von außen durch den Einsatz von Natriumchlorid als Tausalz eine schädigende AKR verstärken kann. In welchem Ausmaß dieses möglich ist, ist bisher nicht hinreichend bekannt und wird im Forschungsinstitut untersucht. Um eine Alkalizufuhr zu simulieren, wurde

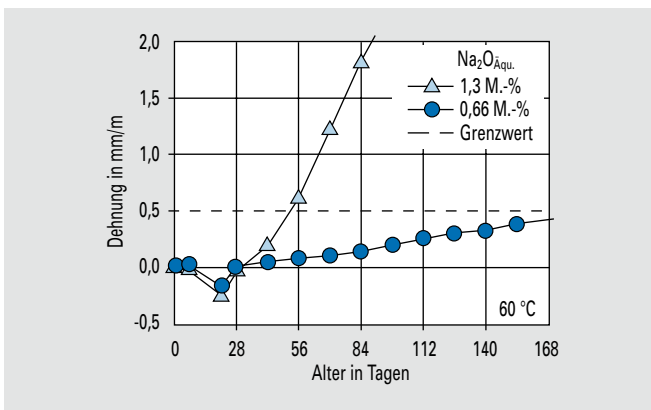
der 60-°C-Betonversuch weiterentwickelt und um Phasen der Trocknung bei 60 °C und der Alkalizufuhr erweitert. **Bild V-29** zeigt die Dehnungen von Betonbalken, die in Lösungen mit unterschiedlichen NaCl-Konzentrationen eingelagert wurden. Die Dehnungen steigen mit zunehmender Konzentration an. Gleichzeitig nimmt die Lösungsaufnahme mit steigender NaCl-Konzentration zu (**Bild V-30**).

Der Grenzwert für die Performance-Prüfung mit Alkalizufuhr von außen wurde zunächst anhand von Praxiserfahrungen auf 0,5 mm/m festgelegt. Dazu wurden auch Betonrezepturen geprüft, mit denen in der Praxis keine Schäden aufgetreten sind (siehe Abschnitt Verkehrswegebau). **Bild V-31** zeigt, dass die Kombination aus einer reaktiven Gesteinskörnung (Reaktivität im mittleren Bereich) und eines

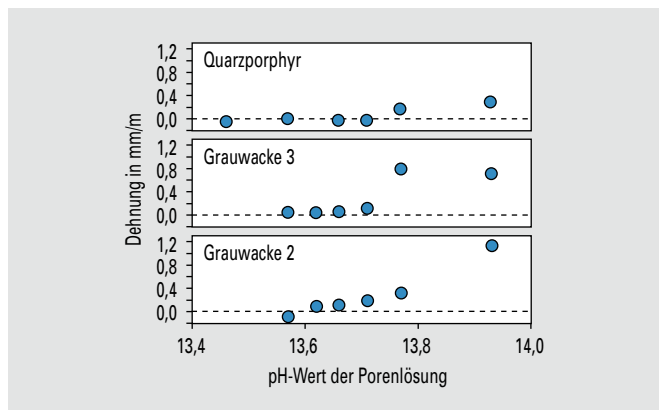
Fahrbahndeckenzements im dargestellten Beispiel zu keiner unzulässigen Dehnung führt. Diese Kombination aus Gesteinskörnung und Zement kann demnach für Fahrbahndecken aus Beton eingesetzt werden. Auf Betone für Flugplätze, die mit anderen Auftaamitteln behandelt werden (Natrium- und Kaliumacetate bzw. -formiate) können diese Untersuchungen nicht übertragen werden.

**pH-Wert der Porenlösung**

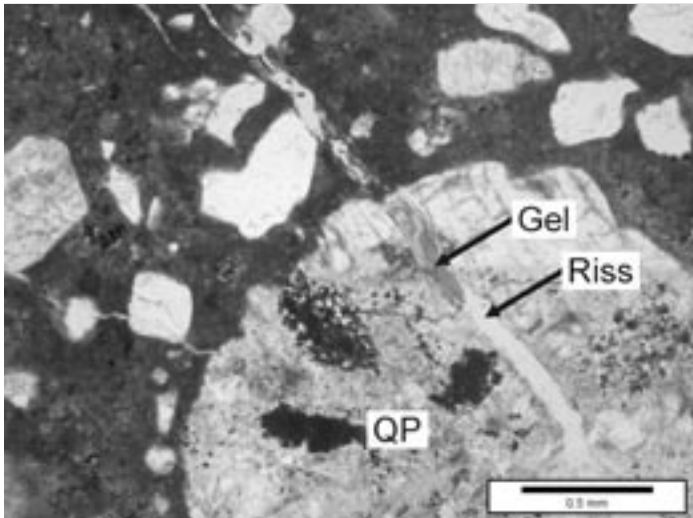
In einem weiteren von der AiF geförderten Forschungsprojekt wurden die Porenlösung von Zementsteinen und die Dehnungen von Betonprismen mit entsprechendem Wasserzementwert und gleichen Zementen untersucht. Die Ergebnisse zeigen einen Zusammenhang zwischen der Alkalität der Porenlösung und der Auslösung einer schädigenden AKR bei



**Bild V-31:** Dehnung von Betonen mit verschiedenen Zementen im 60-°C-Betonversuch (Performance-Prüfung) mit Alkalizufuhr von außen (10%ige NaCl-Lösung), 70 % Splitt Oberrhein;  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Aqu.}} = 1,3 \text{ M.-%}$ ;  $z = 400 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z\text{-Wert} = 0,45$ ;  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Aqu.}} = 0,66 \text{ M.-%}$ ;  $z = 385 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z\text{-Wert} = 0,42$



**Bild V-32:** Porenlösung: Dehnung von Mörtelprismen nach 180 Tagen in Abhängigkeit vom pH-Wert der Porenlösung des entsprechenden Zementsteins. Es wurden verschiedene Portland-, Portlandkomposit- und Hochofenzemente verwendet, die zu den jeweiligen pH-Werten geführt haben



**Bild V-33:**  
Dünnschliff  
eines Betons  
mit gerissenem  
Quarzporphyr-  
korn (QP); Riss  
mit Gel gefüllt



**Bild V-34:**  
Aufsprühen des  
Nachbehand-  
lungsmittels  
durch selbstfah-  
rendes Gerät

Einsatz verschiedener Gesteinskörnungen. Im Versuchsprogramm wurden sowohl Portlandzemente mit unterschiedlichen  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalenten als auch Zemente mit verschiedenen latent-hydraulischen oder puzzolischen Zementhauptbestandteilen verwendet. Erste Ergebnisse der noch laufenden Untersuchungen zeigen, dass für eine gegebene Gesteinskörnung die Dehnung der Betonprismen erst einsetzt, wenn der pH-Wert der Porenlösung des entsprechenden Zementsteins einen bestimmten Wert überschreitet (**Bild V-32**). Allerdings beeinflussen auch andere Parameter, wie die Porosität des Zementsteins, den Ablauf der Reaktion.

### Petrographie

Im Berichtszeitraum wurden geschädigte Betone aus Fahrbahndecken untersucht. Neben Dehnungsmessungen an Probekörpern, die in der 40-°C-Nebelkammer und in der 60-°C-Prüftruhe lagerten (siehe Abschnitt Verkehrswegebau), wurden Dünnschliffe angefertigt, um die Beteiligung einer AKR an den Schäden zu beurteilen. Die Dünnschliffe wurden unter dem Licht-

mikroskop untersucht. Es zeigte sich, dass in einigen Betonen eine AKR stattgefunden hatte, an der Gesteinskörnungen wie etwa Grauwacke und Quarzporphyr (**Bild V-33**) beteiligt waren. Deshalb wurden gebrochene Grauwacke und gebrochener Quarzporphyr in die Alkali-Richtlinie aufgenommen. Ihre Reaktivität ist nach Teil 3 zu prüfen.

### 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. Wasserze-

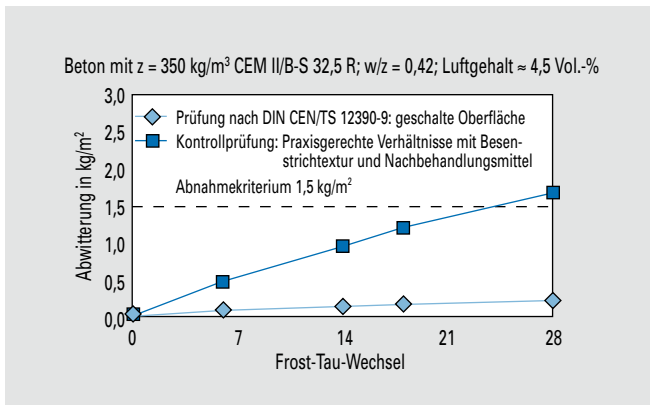
mentwert und Luftgehalt des Frischbetons). Diese betontechnischen Vorgaben beruhen auf langjährigen Erfahrungen. Sie lassen bei sachgerechter Verarbeitung und Nachbehandlung eine hohe Dauerhaftigkeit dieser Betone erwarten.

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

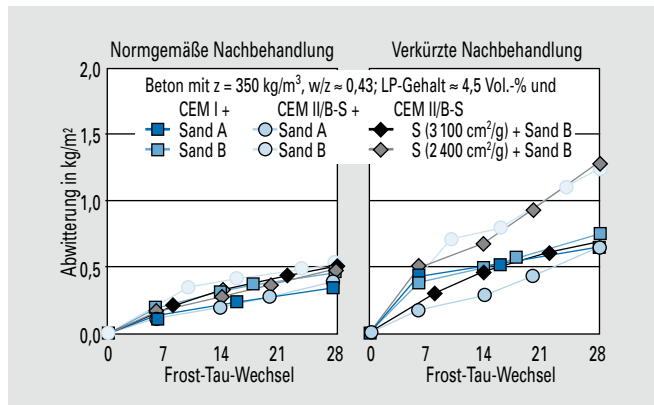
Wesentliche Gebrauchseigenschaften von Betonfahrbahndecken sind neben der Tragfähigkeit und Verformungsstabilität die Oberflächeneigenschaften wie z. B. die Griffigkeit und das Reifen/Fahrbahn-Geräusch. Die Dauerhaftigkeit der Oberflächeneigenschaften hängt insbesondere von der Festigkeit, vom Abnutzwiderstand und vom Frost-Tausalz-Widerstand des Oberflächenmörtels ab.

Besondere Bedeutung für die Gewährleistung eines hohen Frost-Tausalz-Widerstands hat eine sachgemäße Nachbehandlung. In der Praxis werden überwiegend flüssige, filmbildende Nachbehandlungsmittel auf Paraffinwachs-basis verwendet, die auf den verdichteten Frischbeton aufgesprüht werden (**Bild V-34**). Die Wirksamkeit der zum Einsatz kommenden Mittel muss vorab nachgewiesen werden. Eine wichtige Einflussgröße ist dabei der Auftragszeitpunkt. Zudem sollten Nachbehandlungsmittel auf die „mattfeuchte“ Betonoberfläche aufgetragen werden. Allerdings wird dieser Zustand aber insbesondere bei feinteilmarmen Betonen, die zum Wasserabsondern an der Oberfläche neigen, zu einem späteren Zeitpunkt erreicht, als dieses bei anderen Betonen der Fall ist. Bei einem zu früh aufgesprühten Mittel besteht die Gefahr, dass durch aufsteigendes Wasser das Nachbehandlungsmittel verdrängt und eine geschlossene Filmbildung verhindert wird. Die dadurch reduzierte Sperrwirkung beeinträchtigt die Nachbehandlung des Oberflächenmörtels und kann letztlich zu einem verringerten Frost-Tausalz-Widerstand führen. Um den optimalen Zeitpunkt zum Aufbringen des Nachbehandlungsmittels in der Praxis zu garantieren, ist eine gerätetechnische Trennung von Gleitschalungsfertiger (Betonereinbau) und Nachbehandlungsbühne sinnvoll.

Ausgangspunkt von Untersuchungen des Forschungsinstituts zum Frost-Tausalz-Widerstand von Fahrbahndeckenbeton mit CEM II/B-S-Zement war ein Schaden infolge eines Frost-Tausalz-Angriffs an einer Betonfahrbahndecke auf der BAB A4. Für den Beton wurde ein CEM II/B-S 32,5 R verwendet, darüber hinaus kamen



**Bild V-35:** Abwitterung in Abhängigkeit der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel des Betons mit normgemäßer Prüfung (gegen Teflon geschalte Oberfläche) und praxisgerechter Prüfung (Texturierung der Oberfläche mit einem Besenstrich und Auftrag eines flüssigen Nachbehandlungsmittels)



**Bild V-36:** Abwitterung in Abhängigkeit der Frost-Tau-Wechsel der Betone bestimmt mit dem CDF-Verfahren; links normgemäße Nachbehandlung, rechts verkürzte Nachbehandlung in Kombination mit Texturierung der Oberfläche mit einem Besenstrich

für unterschiedliche Teilstücke zwei verschiedene Sande zum Einsatz. In einem dieser Teilstücke wurden nach rund einjähriger Liegezeit (eine Winterperiode) im Jahr 2003 großflächige Abwitterungen des Oberflächenmörtels und vereinzelt Pop-outs beobachtet. Zur Feststellung der Schadensursache wurde im FIZ ein Forschungsprogramm mit dem Ziel durchgeführt, mögliche Einflüsse der Ausgangsstoffe (Zement, Gesteinskörnung) und der Nachbehandlung auf den Frost-Tausalz-Widerstand von Fahrbahndeckenbetonen herauszuarbeiten. Aus heutiger Sicht ist anzumerken, dass die im Schadensfall angewendete damalige Standardbauweise mit der Texturierung des Oberflächenmörtels im Jahr 2006 durch die Waschbetonbauweise abgelöst wurde (siehe Abschnitt Verkehrswegebau). Hierbei wird der im Schadensfall abgewitterte Oberflächenmörtel bereits während der Herstellung gezielt entfernt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Forschungsvorhabens zusammengefasst.

#### Ausgangsstoffe für die Laborversuche

Vielfach werden CEM II/B-S-Zemente mit größerem Hüttensandmehl verwendet, um die Normanforderungen an die zulässige Druckfestigkeit nicht zu überschreiten. Ähnlich wie grob gemahlene Portlandzemente können diese Zemente unter Umständen zu einem höheren Wasserabsondern und zu einer erhöhten Nachbehandlungsempfindlichkeit des Betons führen. Einem hohen Wasserabsondern wird in der Praxis mit einer höheren Feinheit des Zements begegnet. Für die Versuche wurde jeweils ein handelsüblicher Portland- und Portlandhüttenzement desselben Herstel-

lers eingesetzt. Um zu untersuchen, inwieweit die Feinheit von Hüttensand im Zement die Nachbehandlungsempfindlichkeit und damit den Frost-Tausalz-Widerstand solcher Betone beeinflusst, wurden zusätzlich im Labor zwei Portlandhüttenzemente mit feinem (spezifische Oberfläche nach Blaine  $3100 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) bzw. grobem (spezifische Oberfläche nach Blaine  $2400 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) Hüttensand hergestellt. Als Gesteinskörnungen wurden Rheinkies, Diabas- und Orthophyr-Edelsplitt sowie zwei Sande mit geringer (Sand A, eingesetzt im nicht geschädigten Abschnitt der BAB A4) bzw. hoher Wasseraufnahme (Sand B, eingesetzt im geschädigten Abschnitt) verwendet. Im Versuchsprogramm wurden für Fahrbahndecken typische Betonzusammensetzungen mit einem Zementgehalt von  $350 \text{ kg/m}^3$ , einem  $w/z$ -Wert von  $0,43 \pm 0,02$  und einem Luftporengehalt im Frischbeton von rund  $4,5 \text{ Vol.-%}$  hergestellt. Die Konsistenz der Betone wurde durch Variation des Wassergehalts ( $w/z$ -Wert  $0,41$  bis  $0,45$ ) so eingestellt, dass sie für alle Betone annähernd gleich war.

#### Frost-Tausalz-Widerstand

Der Frost-Tausalz-Widerstand wurde als Abwitterung mit dem CDF-Verfahren nach DIN CEN/TS 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 einen Tag in der Schalung, sechs Tage unter Wasser und 21 Tage im Klimaraum bei  $20 \text{ °C}$  und  $65 \text{ % r. F.}$  nachbehandelt. Zusätzlich kam eine verkürzte Nachbehandlung (einen Tag Schalung, einen Tag bei  $20 \text{ °C}$  und  $100 \text{ % r. F.}$  und 26 Tage im Klimaraum bei  $20 \text{ °C}$  und  $65 \text{ % r. F.}$ )

zum Einsatz. In orientierenden Versuchen wurde ein Nachbehandlungsmittel entsprechend den Angaben des Herstellers auf die mit einem Besenstrich texturierte Betonoberfläche aufgesprüht. Da in diesem Fall nicht die geschalte Oberfläche geprüft wird, gilt das für die Beurteilung des Frost-Tausalz-Widerstands mit dem CDF-Verfahren verwendete Abnahmekriterium von  $1,5 \text{ kg/m}^2$  nicht. Gleiches gilt für Kontrollprüfungen an Bohrkernen, die aus der Fahrbahndecke entnommen und mit der texturierten Oberfläche als Prüffläche geprüft werden. Zwischen den Varianten können große Unterschiede auftreten, da im Fall der Bohrkernprüfung der anders zusammengesetzte Oberflächenmörtel und nicht die normgemäß gegen eine Teflonscheibe betonierte Oberfläche geprüft wird (**Bild V-35**).

#### Versuchsergebnisse

Die Sande konnten eindeutig hinsichtlich ihres Wasserausvermögens differenziert werden. Innerhalb von 24 Stunden nahm Sand A rund  $1,5 \text{ M.-%}$  und Sand B rund  $3,5 \text{ M.-%}$  Wasser auf. Sämtliche Betone wiesen ein anforderungsgerechtes Luftporensystem auf. Die Abwitterung der normgemäß nachbehandelten und geprüften Betone (Prüffläche gegen eine Teflonfläche betoniert) war sehr gering (**Bild V-36 links**). Ein Einfluss der Zementart, der Feinheit des Hüttensands oder der Sandqualität auf den Frost-Tausalz-Widerstand war nicht feststellbar. Auch bei einer unzureichenden Nachbehandlung (verkürzte Nachbehandlung, Texturierung mit Besenstrich) war die Abwitterung der Betone gering (**Bild V-36 rechts**). Bei Verwendung des Wasser saugenden Sands B und des Portlandhüttenzements mit feinerem Hüttensand lagen die Abwit-



**Bild V-37:** Betonprüfkörper (w/z = 0,60) auf Basis von Portlandzement (CEM I 32,5 R) und Quarz-Kies- (im Bild oben) bzw. Kalksteinsplitt-Gesteinskörnung (im Bild unten) nach 40 Monaten Lagerung in 0,44%iger Natriumsulfatlösung bei 8 °C.



**Bild V-38:** In grobmaschiger Kunststoffgaze eingepackte Betonwürfel vor der Auslagerung im dahinter zu sehenden gipswassergesättigten See.

terungen im Wertebereich der Betone mit Portlandzement. Lediglich die Kombinationen aus Sand B und dem handelsüblichem CEM II/B-S-Zement sowie aus Sand B und dem Portlandhüttenhüttenzement mit grobem Hüttenand wiesen eine höhere Nachbehandlungsempfindlichkeit auf. Die festgestellten Abwitterungen lagen jedoch noch unterhalb des für das CDF-Verfahren verwendeten Abnahmekriteriums von 1,5 kg/m<sup>2</sup>.

**Einfluss der Nachbehandlung**

Im Jahr 2006 begann das Forschungsinstitut mit weiterführenden Untersuchungen zum Einfluss und zur Optimierung der Nachbehandlung von Straßendeckenbeton mit unterschiedlichen Zementen. Das Vorhaben wird in Zusammenarbeit mit der Bauhaus-Universität Weimar bearbeitet. Dabei werden die gleichen oben genannten CEM I- und CEM II/B-S-Zemente und Gesteinskörnungen verwendet. Zusätzlich wird der Einfluss des Auftragszeitpunkts des

Nachbehandlungsmittels untersucht. Betonplatten werden mit einem Besenstrich texturiert und zu unterschiedlichen Zeitpunkten nachbehandelt. In Abhängigkeit vom Auftragszeitpunkt des Nachbehandlungsmittels wird der Wasserverlust der Betonplatten und damit die Sperrwirkung des Nachbehandlungsmittels geprüft. Anschließend werden aus den Betonplatten Probekörper für die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands in Anlehnung an das CDF-Verfahren hergestellt. Die Versuche werden voraussichtlich 2008 abgeschlossen.

Um den Bauausführenden möglichst zeitnah bereits vorliegende Ergebnisse der Laborversuche und Praxiserfahrungen zur Verfügung zu stellen, hat eine Ad-hoc-Gruppe des VDZ Arbeitskreises Verkehrsbau einen Erfahrungsbericht über die Verwendung von CEM II- und CEM III-Zementen im Straßenbau erstellt. (siehe Abschnitt Verkehrswegebau). Es zeigt sich,

dass mit hüttenandhaltigen CEM II- und CEM III-Zementen Betonfahrbahndecken zielsicher mit der erforderlichen Dauerhaftigkeit hergestellt werden können. Voraussetzung ist die fachgerechte Herstellung der Betonfahrbahndecke mit einer ausreichend langen und wirkungsvollen Nachbehandlung. Wird ein CEM II/B-S-Zement eingesetzt, sollte die Festigkeitsklasse 42,5 gewählt werden. Hierdurch wird das Wasserabsondern des Betons und die Nachbehandlungsempfindlichkeit des Oberflächenmörtels verringert.

**Sulfatwiderstand**

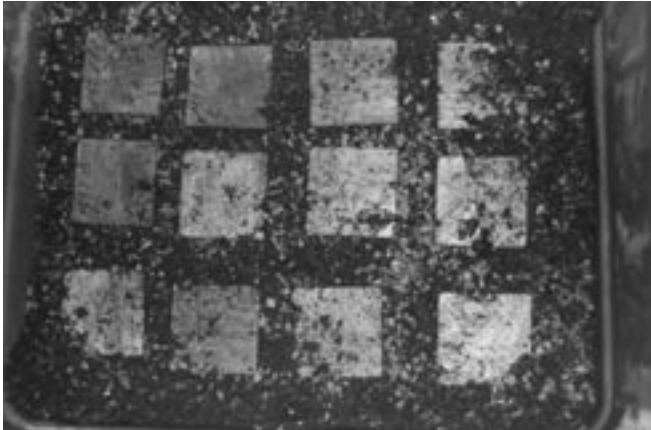
Die im Forschungsinstitut während der letzten Jahre durchgeführten Laboruntersuchungen zeigten, dass ein Sulfatangriff dann zur Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit des Betons führte, wenn der Beton carbonathaltige Bestandteile enthielt, nicht normgerecht hergestellt wurde und der Angriff bei niedriger Temperatur erfolgte. Bei den beobachteten Schäden handelte es sich überwiegend um oberflächennahe Gefügestärkungen. Diese sind vorrangig auf eine Thaumasilbildung zurückzuführen. Man spricht daher auch von Thaumasiltschäden. **Bild V-37** zeigt derart geschädigte Prüfkörper. Thaumasil ist als weißes Reaktionsprodukt erkennbar. Anhand röntgendiffraktometrischer und rasterelektronenmikroskopischer Analysen ist jedoch bekannt, dass das Reaktionsprodukt in den meisten Fällen neben Thaumasil auch Ettringit enthält. Bei normgerechten Prüfkörpern auf Basis von HS-Zementen entstanden hingegen auch bei Verwendung von Kalkstein, als Nebenbestandteil im Zement bzw. als Gesteinskörnung, keinerlei Sulfatschäden – weder in Form von Treibphasen-, noch von Thaumasilbildung.

**Tafel V-3: Versuchsmatrix zum DAFStb-Forschungsprojekt „Vertiefte Untersuchungen zum Sulfatwiderstand von Beton“**

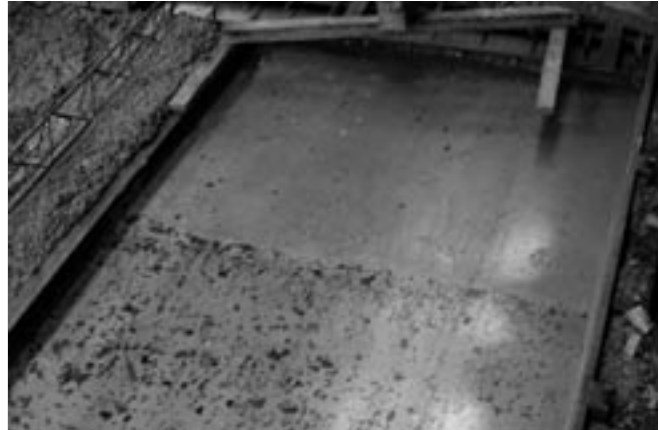
Zement	Gesteinskörnung	FIB	FIB	cbm	FIZ	FIZ
		Labor <sup>1)</sup>	Auslagerung <sup>1)</sup>	Labor	Labor	Auslagerung
CEM I-HS	silikatisch			X	X	X
CEM I-HS	carbonatisch				X	X
CEM I/FA	silikatisch			X		
CEM I/FA	carbonatisch			X	X	X
CEM II/LL/FA	silikatisch	X	X	X	X	X
CEM III/B-HS	silikatisch	X	X	X	X	X
CEM III/B-HS	carbonatisch	X	X		X	X

<sup>1)</sup> jeweils ohne/mit Vorschädigung





**Bild V-39:** Lagerung von Betonwürfeln in einem definierten Bodenmaterial bei 8 °C und einem externen Sulfatangriff durch Natriumsulfatlösung



**Bild V-40:** Korrosion an einem Stahlschalungstisch

### Sonderforschungsvorhaben des DAfStb

Der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) hat 2005 in seinem Sachstandsbericht „Sulfatangriff auf Beton“ festgestellt, dass die verschiedentlich in Laborversuchen beobachteten Thaumasischäden die Folge einer unzureichenden Gefügeverdichtung, also eines unzureichenden physikalischen Sulfatwiderstandes sind. Gründe hierfür seien die hohe Anfangsporosität, hervorgerufen durch einen Wasserzementwert 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, hat der DAfStb im Jahr 2006 ein Sonderforschungsvorhaben mit dem Titel „Vertiefte Untersuchungen zum Sulfatwiderstand von Beton“ initiiert. Die Förderung erfolgt durch Gelder des Deutschen Beton- und Bautechnik-Vereins (DBV), des Bundesverbands der Deutschen Transportbetonindustrie (BTB), des VGB Power Tech und des VDZ. An dem Forschungsprogramm sind neben dem Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ) auch das Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München und das F. A. Finger-Institut für Baustoffe (FIB) der Universität Weimar beteiligt. Bis Ende 2008 werden mit Betonprüfkörpern der Größe 10 x 10 x 10 cm<sup>3</sup> Auslagerungsversuche sowie praxisnahe Laborversuche durchgeführt. **Tafel V-3** zeigt die Versuchsmatrix des Forschungsprogramms. Flugaschefreie Betone wurden mit einem Zementgehalt von 360 kg/m<sup>3</sup> und einem Wasserzementwert  $w/z = 0,50$  hergestellt; für flugaschehaltige Betone wurde ein Zementgehalt von 327 kg/m<sup>3</sup>, ein Flugaschegehalt von 82 kg/m<sup>3</sup> ( $k$ -Wert  $k_f = 0,40$ ) und ein äquivalenter Wasserze-

mentwert ( $w/z_{eq} = 0,50$ ) eingestellt. Die Gesteinskörnung wurde gemäß Sieblinie A/B 16 zusammengesetzt. In den Betonen mit carbonatischer Gesteinskörnung besteht das Material bis 2 mm aus Moränensand und darüber aus Kalksteinsplitt.

Das Forschungsinstitut führt sowohl Auslagerungsversuche als auch spezielle Laborversuche, so genannte Lysimeter-Versuche durch. Da auch im weiteren Umland von Düsseldorf keine geeignete Stätte mit natürlichen Sulfatangriffsbedingungen existiert, wurde für die Auslagerungsversuche alternativ ein Gips-/Anhydrit-Tagebau in Niedersachsen gewählt. **Bild V-38** zeigt einen Teil von insgesamt 60 Betonprüfkörpern, die in einen calciumsulfatgesättigten See bei Stadtoldendorf „versenkt“ wurden. Bis zum vorläufigen Projektabschluss Ende 2008 werden zweimal jährlich die Betonwürfel auf Sulfatschäden untersucht. Es ist beabsichtigt, diese Untersuchungen nach Möglichkeit bis zum Jahr 2016 fortzusetzen, um Erkenntnisse über das Langzeitverhalten der Betone unter praxisrelevanten Bedingungen zu erlangen.

In den Laborversuchen werden Betonwürfel in einem definierten Bodenmaterial eingelagert (**Bild V-39**). Der Sulfatangriff erfolgt durch eine Natriumsulfatlösung, mit der das Bodenmaterial gesättigt wird. In regelmäßigen Abständen wird der Boden trockengelegt und anschließend wieder mit frischer Lösung befüllt. Hierdurch sollen natürliche Grundwasserschwankungen simuliert werden. Die Lagerung erfolgt bei 8 °C und orientiert sich somit an der mittleren Bodentemperatur in Deutschland.

Das FIB führt seine Auslagerungsversuche in einem Stollen in Thüringen durch. Im Mittelpunkt stehen die vergleichenden Untersuchungen an Betonprüfkörpern

mit und ohne Riss-Vorschädigung. Das cbm geht schließlich der Frage nach, ob im Beton eine über die heute geforderte Mindestdosierung hinaus gehende Flugaschezugabe notwendig ist, um auch bei niedriger Temperatur einen ausreichenden Sulfatwiderstand sicherzustellen.

### Aktuelle Korrosionsfragen Chromatreduzierung und Zinkkorrosion

Seit dem 17.01.2005 ist der Gehalt an wasserlöslichem Chromat in Zement oder zementhaltigen Zubereitungen gesetzlich auf maximal 2 ppm beschränkt worden (Richtlinie 53/2003/EG „Chromatrichtlinie“ und Gefahrstoffverordnung GefStoffVO). Dieses wird z. B. durch Zugabe einer geringen Menge eines chromatreduzierenden Stoffs bereits bei der Zementherstellung erreicht.

Bei Kontakt von verzinkten Metallen (z. B. verzinkte Stahldrahtfasern) mit dem frischen Beton können Oberflächenreaktionen zwischen der Zinkschicht und dem alkalischen Milieu des Betons auftreten. Die Bildung gasförmiger Reaktionsprodukte kann in Einzelfällen sowohl den Verbund zwischen Beton und Metall als auch die Qualität der Betonoberfläche beeinträchtigen. Diese Reaktion wurde bisher durch einen ausreichenden Gehalt an löslichen Chromaten wirksam verhindert. Hierzu hat in der Regel schon das im Zement enthaltene Chromat ausgereicht. Teilweise wurden ergänzend beim Einmischen verzinkter Stahlfasern in den Beton zusätzlich Chromatsalze beigefügt. Betonzusätze, die im Frischbeton zu einer Überschreitung des Chromatgehalts von 2 ppm bezogen auf den Zementgehalt führen, verstoßen jedoch gegen die genannten gesetzlichen Regelungen.

Bei Verwendung von verzinkten Einbauteilen oder verzinkten Stahldrahtfasern im Beton ist daher sicherzustellen, dass bei Einhaltung der gesetzlichen Regelungen bezüglich des Chromatgehalts keine Beeinträchtigung des Materialverbunds oder der Betonoberfläche auftritt.

#### *Korrosion an Stahlschalungen*

In der Fertigteilindustrie stellt die Korrosion von Stahlschalungen immer wieder ein Problem dar (**Bild V-40**). Innerhalb der kurzen Ausschulfristen von rund zwölf Stunden bilden sich in einigen Fällen auf den Oberflächen der Stahlschalungstische Rostflecke. Diese können in sehr unterschiedlichen Erscheinungsformen auftreten. Es kommt zu punktuellen, linienförmigen und teilweise flächigen Korrosionsstellen. Häufig treten die Roststellen in den Randbereichen, insbesondere im Bereich der Querabsteller auf.

Die Korrosionserscheinungen können auf umweltbedingte, produktionsbedingte und betontechnologische Ursachen zurückgeführt werden. Zu den umweltbedingten Ursachen zählt z.B. das Rosten infolge Kondenswasserbildung. Eine Kondenswasserbildung tritt bevorzugt dann auf, wenn Betonfertigteile in beheizten Kammern oder unter Dampf aushärten. Infolge des „Schüsselns“ entstehen zwischen Beton und Stahlschalung geringfügige Spalte, in denen eine Kondenswasserbildung zur Korrosion der Stahlschalung führt. Produktionsbedingte Ursachen finden sich vor allem in der unsachgemäßen Oberflächenbearbeitung der Stahlschalungen, der Verwendung von wasserlöslichen Markierungsmitteln oder der fehlerhaften Anwendung von Trennmitteln. Zu den betontechnologischen Ursachen, die Rosten fördern können, gehört vor allem das Bluten des Frischbetons. Aufgrund der vielfältigen Ursachen ist in der Regel in jedem Fertigteilwerk eine individuelle Betrachtung der jeweiligen Randbedingungen vorzunehmen. Sowohl durch einfache betontechnologische als auch durch geeignete verfahrenstechnische Maßnahmen kann diesem Problem der Rostfleckenbildung begegnet werden. Häufig ist bereits eine Reduzierung des Kontaktwasserangebots an der Schalungsoberfläche durch Verwendung von Betonmischungen, die nicht zum Bluten neigen, zielführend. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurde das Problem der Stahlschalungskorrosion an der TU München systematisch untersucht. Die Untersuchungen wurden durch das Forschungsinstitut begleitet.

## Sichtbeton ■

Sichtbeton erfreut sich wieder einer wachsenden Beliebtheit. Bauherren und Architekten haben in den letzten Jahren Betonoberflächen als Stilmittel und Gestaltungsform moderner Architektur wiederentdeckt. Beispiele aus jüngerer Zeit belegen, insbesondere für repräsentative Bauwerke, die Forderung nach glatten, farblich einheitlichen Sichtbetonoberflächen mit scharfen Kanten.

#### **Verbundforschung – Sichtbeton**

Trotz sachgerechter Planung und Ausführung konnten einwandfreie Sichtbetonoberflächen mit dem heutigen Wissensstand in den Bereichen Beton-, Schalungs- und Ausführungstechnik nicht immer zielsicher erreicht werden. Deshalb wurde in einem Verbund von Fachleuten aus Praxis und Wissenschaft, unter gemeinsamer Federführung des Deutschen Beton- und Bautechnik Vereins E. V. (DBV) und des Vereins Deutscher Zementwerke e. V. (VDZ), ein von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF) gefördertes Verbundforschungsvorhaben zum Thema „Sichtbeton“ durchgeführt. Es wurden systematisch die Phänomene untersucht, die zu Beanstandungen führen können. Hierzu zählen z. B. Wolkenbildungen, Marmorierungen, Verfärbungen, Porenhäufung und Schleppeffekte. Die Schwerpunkte der Verbundforschung betrafen dementsprechend die Entstehung und Vermeidung von Farbunterschieden auf Sichtbetonoberflächen, die Wechselwirkungen zwischen Beton, Schalung und Trennmittel, die Zusammensetzung und Prüfung von Rezepturen zur Herstellung von Sichtbeton sowie die bildgestützte Bewertung von Sichtbetonoberflächen.

#### **Forschung im Forschungsinstitut**

Im Forschungsinstitut wurden die Ursachen von Verfärbungen und Wolkenbildungen auf Sichtbetonoberflächen untersucht. Der Einfluss von Fließmitteln und der Vibrationsverdichtung auf das Sedimentationsverhalten stand dabei im Vordergrund. Parallel dazu wurden am Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TU München Farbercheinungen auf Sichtbetonoberflächen im Hinblick auf Transport- und Kristallisationsvorgänge im erhärtenden Beton untersucht.

Die Ergebnisse der Forschungen am FIZ zeigen, dass bei Verwendung von verflüssigenden Zusatzmitteln der Sättigungspunkt, d. h. die Menge an Fließmittel, durch die eine vollständige Dispergierung der Parti-

kel erreicht wird, für die Sedimentation und Verfärbung von Sichtbetonoberflächen eine entscheidende Rolle spielt. Nahezu alle an Sichtbetonflächen als Beeinträchtigung des optischen Erscheinungsbilds auftretenden Farb- und Sedimentationserscheinungen konnten bei Verwendung von Fließmittelmengen über dem Sättigungspunkt beobachtet werden. Hierbei traten z. B. dunkle und glasige Verfärbungen, Wolkenbildungen, Marmorierungen, „Wasserläufer“ sowie Schleppeffekte auf.

Der Sättigungspunkt trat bei Verwendung von Fließmitteln auf der Basis von Polycarboxylatether (PCE) stets früher ein als bei Fließmitteln mit den Wirkstoffen Melaminsulfonat, Naphthalinsulfonat und Calciumligninsulfonat. Ein systematischer Einfluss der Zementart auf den Sättigungspunkt konnte nicht festgestellt werden. Der Sättigungspunkt ist vielmehr von der Feinheit und der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung des Zements abhängig.

An jeweils fünf Mörtelzylindern mit einem Durchmesser von rund 30 mm und einer Höhe von rund 200 mm wurde durch Verdichtung auf dem Vibrationstisch der Einfluss von Verdichtungszeit und -intensität auf die Sedimentation und Verfärbung der Mörteloberfläche untersucht. Alle Zement/Zusatzstoff/Fließmittel-Kombinationen ergaben bei Fließmitteldosierungen unterhalb des Sättigungspunkts stabile sedimentationsfreie Mörtel ohne signifikante Verfärbungen.

In **Bild V-41** sind insgesamt zehn Mörtelzylinder dargestellt. Der Mörtel setzte sich aus rund einem Masseteil CEM II/B-S 32,5 R, rund 0,2 Masseteilen Steinkohlenflugasche und rund 1,1 Masseteilen Visco-Normsand (Korngröße  $\leq 1$  mm) zusammen. Der äquivalente Wasserzementwert betrug 0,45. Der Mörtel enthielt, bezogen auf den Sättigungspunkt, eine 1,5-fache Überdosierung an Melaminsulfonat (linkes Foto) bzw. an PCE-Fließmittel (rechtes Foto). Der jeweils erste Zylinder verblieb nach dem Befüllen unverdichtet. Die Zylinder zwei bzw. drei wurden auf dem Vibrationstisch bei einer Schwingbreite von 0,75 mm für 60 Sekunden bzw. 120 Sekunden verdichtet. Die Zylinder vier bzw. fünf wurden 60 Sekunden bzw. 120 Sekunden bei einer Schwingbreite von 1,3 mm verdichtet.

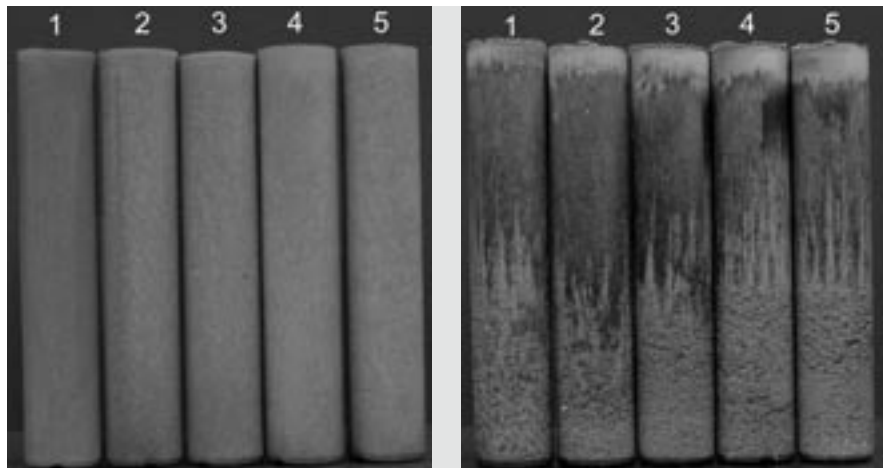
Die Mörtelzylinder wurden nach sieben Tagen entfernt. Nach weiteren 21 Tagen Lagerung bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte wurde die Oberfläche visuell beurteilt. Als „sehr robust“ wurden

Zement/Zusatzstoff/Fließmittel-Kombinationen bezeichnet, die selbst bei einer 1,5-fachen Überdosierung des Fließmittels, bezogen auf den Sättigungspunkt, keine Sedimentationserscheinungen und Verfärbungen aufwiesen. Als „robust“ wurden die Kombinationen eingestuft, die am „Sättigungspunkt“ unabhängig von allen Verdichtungsparametern gegenüber einer Sedimentation stabil waren und keine Verfärbungen aufwiesen. In die Klassen „wenig robust“ bzw. „nicht robust“ wurden Zement/Zusatzstoff/Fließmittel-Kombinationen eingestuft, die nur bei geringer Verdichtungszeit und -intensität am Sättigungspunkt bzw. nur unterhalb des Sättigungspunkts ein stabiles Verhalten zeigten.

Wie aus dem linken Foto in Bild V-41 hervorgeht, wiesen die Zylinder mit Melaminsulfonat – trotz Überdosierung und unabhängig von der Verdichtungszeit und -intensität – eine homogene Oberfläche ohne Sedimentation und Verfärbung auf. Dieses „sehr robuste“ Verhalten wurde bei nahezu allen untersuchten Mörteln mit Fließmittel auf der Basis von Melaminsulfonat unabhängig von der Zementart festgestellt.

Das Fließmittel auf der Basis von PCE führte in vielen Fällen bezüglich des Sedimentationsverhaltens zu „sehr robusten“ Mörteln. Teilweise ergaben sich bei Verwendung von PCE jedoch auch „nicht robuste“ Mörtel, wie im rechten Foto von Bild V-41 dargestellt. Bei diesen konnte eine ausgeprägte Sedimentation, bei der sich die dispergierten Bestandteile entsprechend der Teilchengröße und -masse absetzen, beobachtet werden. Das war stets mit einer starken Verfärbung verbunden. Mörtel mit Fließmittel auf der Basis von Naphthalinsulfonat zeigten ein „weniger robustes“ bis „robustes“ Verhalten. Mörtel und Betone, die mit Portlandzement bzw. Portlandkalksteinzement hergestellt wurden, wiesen unabhängig vom Fließmitteltyp ein „robustes“ bis „sehr robustes“ Verhalten gegenüber Sedimentation auf, was die Erfahrungen aus der Praxis widerspiegelt. In einigen Fällen traten mit hüttensandhaltigen Zementen z. T. Sedimentationserscheinungen und Verfärbungen auf. Dem wird in einem weiteren Forschungsvorhaben nachgegangen.

Mörtel mit einer Fließmitteldosierung am Sättigungspunkt und darüber hinaus wiesen stets ein dunkleres Erscheinungsbild auf als Mörtel mit geringeren Fließmittelgehalten.



**Bild V-41:** Mörtelzylinder (Durchmesser 30 mm, Höhe 200 mm), Zylinder 1 = unverdichtet, Zylinder 2 bzw. 3 mit Schwingbreite  $s = 0,75$  mm für 60 Sekunden bzw. 120 Sekunden verdichtet, Zylinder 4 bzw. 5 wurden 60 Sekunden bzw. 120 Sekunden bei einer Schwingbreite  $s = 1,3$  mm verdichtet; 1,5-fache Überdosierung des jeweiligen Fließmittels bezogen auf den Sättigungspunkt; Fließmittel auf der Basis von Melaminsulfonat (linkes Foto) und PCE (rechtes Foto)

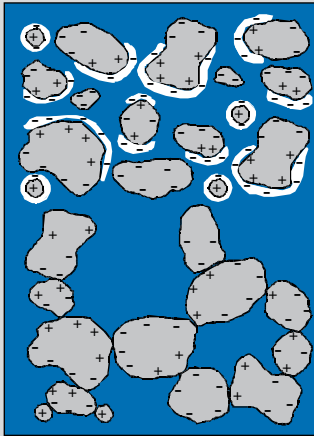

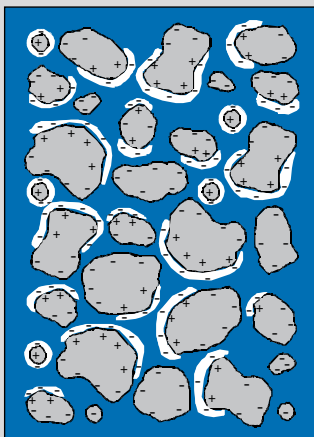

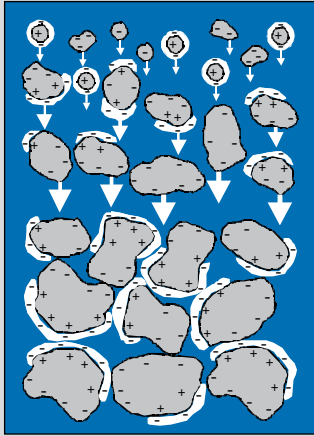
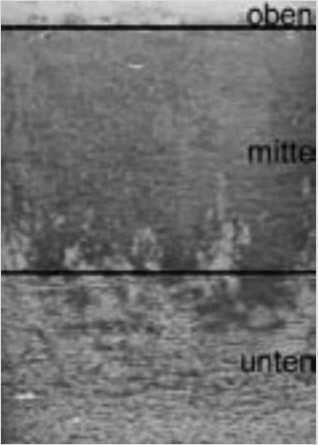
Die Sättigungspunkte der Versuchsbetone lagen jeweils über denen des entsprechenden Mörtels. Im Sedimentationstest stabile Mörtel waren in jedem Fall auch im Beton stabil gegenüber Sedimentation. Die Verdichtungsmethode (Innenrüttler oder Rütteltisch) hatte in Bezug auf das Sedimentationsverhalten und die Betondruckfestigkeiten keinen signifikanten Einfluss. Tendenziell führte die Verdichtung auf dem Rütteltisch zu einer geringfügig schnelleren Entlüftung des Betons. Der Einfluss der Verdichtungsmethode sowie der Verdichtungsdauer und -intensität war im Vergleich zu den Auswirkungen der Fließmitteldosierung für das Sedimentationsverhalten von untergeordneter Bedeutung. Die an den Betonen mit hohen Fließmitteldosierungen beobachteten Sedimentationserscheinungen beschränkten sich unmittelbar auf die Betonoberfläche.

In **Bild V-42** ist der Einfluss der auf den Sättigungspunkt bezogenen Fließmittelmenge auf das Sedimentationsverhalten und die Zementleimstruktur an der Betonoberfläche schematisch dargestellt. Die Fotos zeigen Oberflächen von Betonen, die mit entsprechenden Fließmittelmengen hergestellt wurden. Die Auswirkungen der Fließmitteldosierung auf die Hydratation, die Zusammensetzung der Porenlösung und die Hydratphasen werden als mögliche Ursachen für die an Sichtbetonoberflächen beobachteten Sedimentationserscheinungen und Verfärbungen beschrieben.

Fließmittelmengen (FM) weit unterhalb des Sättigungspunkts (SP) von Beton (FM

$\ll$  SP) verzögern die Hydratation meist nur geringfügig und verursachen bei Betonen mit üblicher Zusammensetzung im Allgemeinen keine Sedimentation. An der Betonoberfläche befinden sich überwiegend CSH-Phasen und Calciumcarbonat. Die Oberfläche weist eine homogene Färbung auf (Bild V-42, Zeile 1).

Liegt die Fließmitteldosis im Bereich des Sättigungspunkts (FM = SP, Bild V-42, Zeile 2) sind die meisten Zementpartikel mit Fließmittelmolekülen belegt und liegen dispergiert vor. In Abhängigkeit vom Wasser/Feststoff-Verhältnis sind diese Systeme gegenüber Sedimentation noch stabil. Mit zunehmender Belegung der Zementoberfläche durch Fließmittelmoleküle wird die weitere Zementhydratation verstärkt verzögert. Innerhalb des Verzögerungszeitraums verbleiben u. a. die Gehalte an gelöstem Calcium und Sulfat auf dem Anfangsniveau, während sie bei nicht verzögerter Hydratation innerhalb weniger Stunden, infolge fortschreitender Ettringitbildung, deutlich abnehmen. Aufgrund der Verzögerung kann sich die Porenlösung, z. B. infolge hydrostatischen Drucks oder kleinerer Bewegungen der Schalung, zwischen Frischbeton und Schalung anreichern. Geschieht das in geringem Ausmaß, wird die Porenlösung bei fortschreitender Hydratation des Zements verbraucht und zurück bleibt eine nahezu amorphe Schicht aus Calciumhydroxid. Die Hydratationsprodukte in dieser Schicht sind teilweise kleiner als die Wellenlänge des Lichts. Das führt zu einer spiegelnden Reflexion des einfallenden Lichts. Dadurch lässt sich die

	Fließmitteldosis	Ansicht – Sichtbeton	Wirkung
1	<p>FM &lt;&lt; SP</p> 		<p><b>Hydratation:</b> leicht verzögert</p> <p><b>Sedimentationsneigung:</b> sehr gering (sehr stabil)</p> <p><b>Porenlösung:</b> keine Anreicherung von Porenlösung zwischen Frischbeton und Schalung, schneller Abbau der Calcium- und Sulfatgehalte in der Porenlösung durch Hydratation</p> <p><b>Oberfläche:</b> CSH-Phasen, CaCO<sub>3</sub></p> <p><b>Farbe der Oberfläche:</b> „grau“ (raue Struktur)</p>
2	<p>FM = SP</p> 		<p><b>Hydratation:</b> verzögert</p> <p><b>Sedimentationsneigung:</b> gering (stabil)</p> <p><b>Porenlösung:</b> geringe Anreicherung von Porenlösung zwischen Frischbeton und Schalung, hohe Calcium- und Sulfatgehalte in der Porenlösung während der Verzögerungsdauer</p> <p><b>Oberfläche:</b> amorphe Schicht aus Ca(OH)<sub>2</sub></p> <p><b>Farbe der Oberfläche:</b> dunkel (glasartige Struktur)</p>
3	<p>FM &gt; SP</p> 		<p><b>Hydratation:</b> stark verzögert</p> <p><b>Sedimentationsneigung:</b> hoch (instabil), „aufstockende“ Sedimentation</p> <p><b>Porenlösung:</b> starke Anreicherung von Porenlösung zwischen Frischbeton und Schalung möglich, hohe Calcium- und Sulfatgehalte in der Porenlösung während der Verzögerungsdauer</p> <p><b>Oberfläche:</b> Die „aufstockende“ Sedimentation kann je nach sedimentierter Komponente zu unterschiedlich zusammengesetzten Oberflächen führen.                      unterer Bereich: „Wasserläufer“ – z.B. Sand, CSH-Phasen                      mittlerer Bereich: amorphe Schicht aus Ca(OH)<sub>2</sub>                      oberer Bereich: CSH-Phasen (große Kristalle)</p> <p><b>Farbe der Oberfläche:</b>                      unterer Bereich: helle Maserung                      mittlerer Bereich: dunkel, glasartig                      oberer Bereich: sehr hell</p>

**Bild V-42: Einfluss der Fließmittelmenge (FM) in Relation zum Sättigungspunkt (SP) auf das Sedimentationsverhalten, die Hydratation von Zement und mögliche Auswirkungen auf die Zusammensetzung und Farbe der Sichtbetonoberfläche**

glänzende Oberfläche des Betons erklären. Diese Bereiche erscheinen dunkler als rauere Bereiche mit größeren Kristalliten.

Eine Fließmitteldosis über dem Sättigungspunkt ( $FM > SP$ , Bild V-42, Zeile 3) führt zu einer ausgeprägten Sedimentation und starken Verzögerung der Hydratation. Hierbei kann der Wasserzementwert im oberen Abschnitt des Sedimentationsbereichs, in dem überwiegend die feinen Partikel des Bindemittels sedimentieren, niedriger sein als im unteren Bereich, wo vermehrt gröbere Bestandteile, wie Kies und Sand, vorliegen. Das würde erklären, warum „Wasserläufer“ häufig in den unteren Abschnitten der von der Sedimentation betroffenen Bereiche auftreten. In den „Wasserläufern“ befinden sich neben feiner Gesteinskörnung große Kristallite von Hydratphasen, die als helle Maserung erscheinen. Der mittlere Bereich erscheint oft dunkler, was auf eine Schicht aus amorphem Calciumhydroxid zurückzuführen ist. Der obere Bereich setzt sich aus einem lockeren Gefüge „in Schwebe“ vollständig hydratisierter Zementpartikel zusammen, deren Kristallite sich teilweise ideomorph ausbilden können und als fast weiße Schicht erscheinen.

Auch bei Betonen mit einer Fließmitteldosierung knapp unterhalb des Sättigungspunkts kann eine Oberflächensedimentation auftreten, wenn sich Porenlösung im Bereich zwischen Frischbeton und Schalung ansammeln kann. Die Anreicherung von Porenlösung führt zu einer nachträglichen Erhöhung des Wasserzementwerts im Oberflächenbereich. Dadurch kann der Sättigungspunkt des Fließmittels in diesen Bereichen so abgesenkt werden, dass eine Sedimentation eintreten kann. Das erklärt die an Betonstützen häufig beobachtete Oberflächensedimentation bei einem gleichzeitig nahezu homogenen Betonquerschnitt.

Grundsätzlich kann das Risiko des Auftretens von Oberflächensedimentation und Verfärbungen vermindert werden, indem Betone mit nur sehr geringer Wasserabsonderung verwendet werden. Hierbei sollte eine Fließmitteldosierung weit unterhalb des Sättigungspunkts und eine gut abgestufte, mehlkornreiche Sieblinie verwendet werden. Erschütterungen der Schalung, die nach dem Einbringen in der Frischbetonphase zu Saugeffekten und somit zur Anreicherung von Porenlösung im Bereich zwischen Frischbeton und Schalung führen können, sollten vermieden werden.

## Selbstverdichtender Beton ■

Selbstverdichtender Beton (SVB) ist ein Hochleistungsbeton, dessen besonderes Leistungsvermögen in der Frischbetoneigenschaft „Selbstverdichtung“ besteht. Er weist neben einem erheblichen Potenzial zur Rationalisierung in der Betonfertigteilproduktion auch Vorteile für den Bauablauf auf der Baustelle auf. Um diese Vorteile zu nutzen, ist größte Sorgfalt bei der Herstellung und in der Qualitätssicherung zwingend erforderlich.

Im Rahmen eines Gemeinschaftsforschungsvorhabens der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e. V. (FTB), Kamp-Lintfort, und des Forschungsinstituts wurden die Einflüsse auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften selbstverdichtender Betone untersucht. Ziel ist es, die Herstellung und den Einsatz von SVB als Transportbeton der Festigkeitsklassen C 25/30 und C 30/37 unter Verwendung typischer Anlagen und Rohstoffe sicher zu ermöglichen. Die Ergebnisse zeigen auf der einen Seite, dass durch gezielte Einstellung der Wasser- und Fließmittelgehalte die Verarbeitbarkeitseigenschaften zeitlich sehr genau gesteuert werden können. Auf der anderen Seite verdeutlichen die Ergebnisse, dass Schwankungen der Wasser- und Fließmittelgehalte sehr genau

beobachtet und ggf. durch geeignete Maßnahmen kompensiert werden müssen. Die Untersuchungsergebnisse unterstreichen die Bedeutung von sorgfältig geplanten Vorversuchen sowie Erst- und Kontrollprüfungen bei Herstellung und Verarbeitung von SVB als Transportbeton.

Um die Ergebnisse der Laborbetone in der Praxis zu überprüfen, wurden SVB in zwei Transportbetonwerken hergestellt und die Frisch- und Festbetoneigenschaften untersucht. Anschließend wurden mit Betonen unter Verwendung der Materialkombinationen Hochofenzement und Steinkohlenflugasche sowie Portlandzement und Kalksteinmehl Probewände betoniert (Bild V-43).

Aus den erzielten Ergebnissen wurde ein Konzept zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit von SVB unter Praxisbedingungen entwickelt. Feste Grenzwerte oder Verarbeitbarkeitsklassen sind nicht geeignet, um die Verarbeitungseigenschaften von SVB richtig zu erfassen. Bei der Rezepturentwicklung und in der Erstprüfung ermittelt der Betonhersteller in Frisch- und Festbetonprüfungen den optimalen Verarbeitbarkeitsbereich für seinen SVB. Der optimale Verarbeitbarkeitsbereich ist dadurch gekennzeichnet, dass der Beton ausreichend fließt, entlüftet und sedimen-



**Bild V-43: Praxistest – Herstellung einer Probewand mit SVB**



**Bild V-44:**  
VDZ-Auslauf-  
kegel zur Be-  
stimmung der  
Frischbeton-  
eigenschaften  
von SVB im  
Baustellenein-  
satz

tationsstabil ist. Um für alle Formen des SVB einheitliche Regeln und Bewertungsmaßstäbe zu setzen, wurde ein Verfahren zur Bestimmung des Verarbeitbarkeitsbereichs von SVB vorgeschlagen („SVB-Verarbeitungsfenster“). Dieses Verfahren wurde auf der Basis einer Vielzahl von Untersuchungen entwickelt, verifiziert und validiert. Es wurde als Anhang Q in die Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton „Selbstverdichtender Beton“ aufgenommen.

Zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit von SVB wird in der Erstprüfung, während der werkseitigen Produktionskontrolle des Herstellers und bei der Übergabe des Betons auf der Baustelle die Ermittlung des Setzfließmaßes und der Trichterauslaufzeit gefordert. Dabei bereitet die Ermittlung der Trichterauslaufzeit bei der Übergabe von SVB als Transportbeton unter Baustellenbedingungen häufig Probleme. Um den Prüfaufwand bei der Übergabe von SVB als Transportbeton zu vereinfachen, wurde mit dem „Auslaufkegel“ (**Bild V-44**) ein baustellentaugliches Prüfgerät entwickelt, mit dem die beiden Prüfwerte (Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit) in einem einzigen Versuch zuverlässig ermittelt werden können.

Mithilfe dieser Forschungsarbeit wurde ein wesentlicher Beitrag geleistet, um SVB als Transportbeton gemäß DIN EN 206-1/ DIN 1045-2 in Verbindung mit der SVB-Richtlinie des DAfStb als qualitativ gesicherte Alternative zum Rüttelbeton einsetzen zu können.

## Ultrahochfester Beton ■

Ultrahochfester Beton (engl.: Ultra High Performance Concrete, UHPC) ist eine Weiterentwicklung des hochfesten Betons. Als ultrahochfest werden Betone mit Druckfestigkeiten zwischen etwa 150 und 300 N/mm<sup>2</sup> bezeichnet. Ein anerkanntes Regelwerk für UHPC existiert in Deutschland bisher nicht. Im Rahmen eines Schwerpunktprogramms der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) werden alle wesentlichen Aspekte der Herstellung und Anwendung von UHPC umfassend erforscht. Weitgehend bekannt ist inzwischen, wie Druckfestigkeiten von mehr als 150 N/mm<sup>2</sup> sicher erreicht werden können. Die konsequente Anwendung der bereits vom hochfesten Beton bekannten beton-technologischen Maßnahmen zur Festigkeitssteigerung – Senkung des Wasserzementwerts, Verwendung von Silicastaub und Optimierung der Packungsdichte bis in den Mikrobereich hinein – ermöglicht Druckfestigkeiten bis etwa 200 N/mm<sup>2</sup>. Noch höhere Festigkeiten lassen sich durch Zusatzmaßnahmen erzielen. Hierzu zählen im Wesentlichen die Wärmebehandlung, das Mischen im Vakuum und die Druckverfestigung. Bei der gebräuchlichsten Art der Wärmebehandlung wird der Beton nach einer zweitägigen Vorlagerung 48 Stunden lang in 90 °C heißer Luft gelagert. Er hat danach annähernd seine Endfestigkeit erreicht. Das Mischen im Vakuum führt zu einem deutlich geringeren Eintrag von Luft in den Frischbeton, während das nachträgliche Entlüften durch Rütteln wegen der oft klebrigen Konsistenz von UHPC weniger

effektiv ist. Mit der Druckverfestigung liegen bisher nur wenige Erfahrungen vor. Der geschalte Beton erstarrt und erhärtet dabei unter der Einwirkung einer Drucklast.

## Dauerhaftigkeit

UHPC gilt als sehr dauerhaft. Sowohl die Gesamt- als auch die für Transportvorgänge maßgebliche Kapillarporosität sind deutlich geringer als bei normal- und hochfestem Beton. So beträgt zum Beispiel die typische Carbonatisierungstiefe nach einem Jahr weniger als 0,1 mm.

Entsprechende Untersuchungen werden jedoch üblicherweise an ungeschädigten Probekörpern durchgeführt. Unklar ist, ob die Dauerhaftigkeit von UHPC durch Risse beeinträchtigt werden kann. Insbesondere die Auswirkungen möglicher Treibreaktionen auf das extrem dichte Gefüge von UHPC sind bisher nicht ausreichend erforscht.

## Rissbildung infolge behinderter Schwindverformungen

Als Ursache für Risse kommen neben Temperaturdehnungen und Biegezugspannungen vor allem behinderte Schwindverformungen in Frage. Besonders ausgeprägt ist bei UHPC das autogene Schwinden, das ohne die Abgabe von Feuchte an die Umgebungsluft stattfindet. Anders als das Trocknungsschwinden nimmt es mit sinkendem Wasserzementwert in der Regel zu. Bleibt aufgrund von Wassermangel ein größerer Teil des Zements unhydratisiert, kommt es zu einer inneren Austrocknung, auch „Selbstaustrocknung“ genannt. Dabei entsteht in den ganz oder teilweise ausgetrockneten Poren ein so hoher Unterdruck, dass sich der Zementstein zusammenzieht. Eine Behinderung dieser Kontraktion, zum Beispiel durch die Gesteinskörnung oder ein angrenzendes Bauteil, führt im Beton zu Spannungen, die Risse zur Folge haben können.

## Mögliche Schadensmechanismen

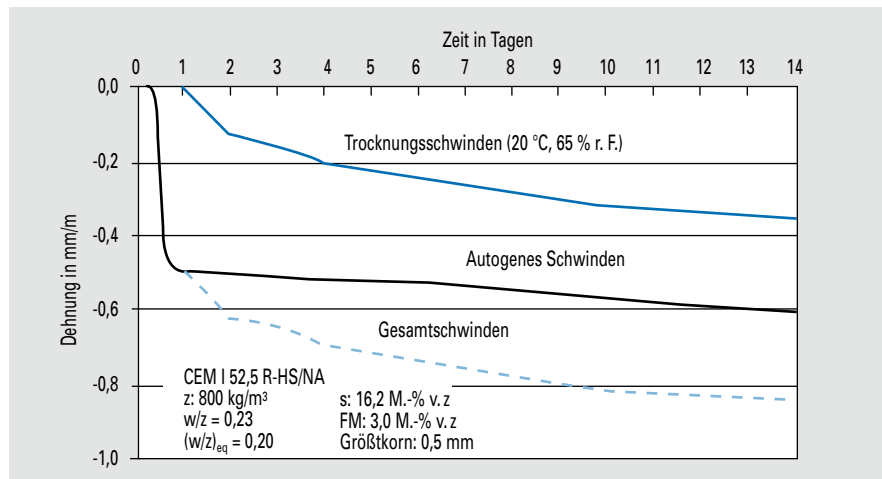
Über Risse können Flüssigkeiten und Gase in den Beton eindringen und unterschiedliche Schadensmechanismen auslösen. Dringt Wasser in das Gefüge von UHPC ein, findet im günstigsten Fall eine Selbstheilung der Risse durch Nachhydratation statt. Unter ungünstigen Bedingungen sind verschiedene Schadensmechanismen denkbar, wie etwa eine sekundäre Ettringitbildung oder eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Beide Reaktionen können zu betonschädigenden Quelldrücken führen und somit die Dauerhaftigkeit des Betons beeinträchtigen.

## Schwinden von UHPC

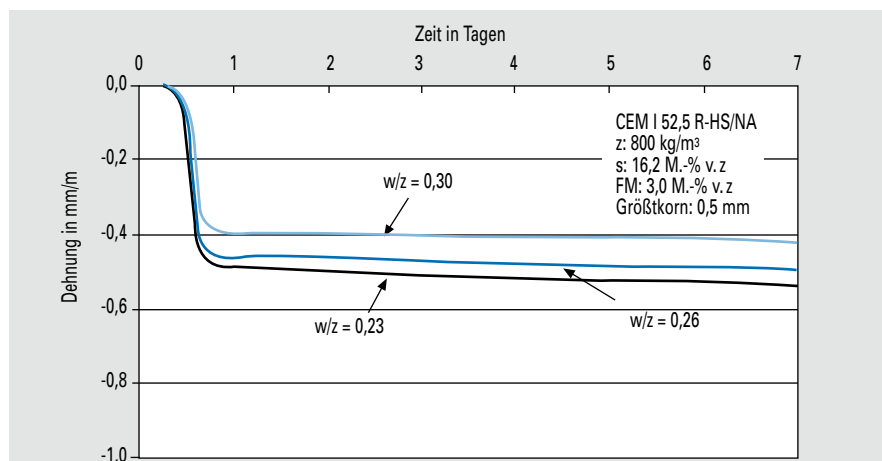
Im Forschungsinstitut wurden im Rahmen eines durch die DFG geförderten Forschungsprojekts zur Dauerhaftigkeit von UHPC zunächst sowohl das autogene als auch das Trocknungsschwinden von UHPC gemessen. Beide Schwindarten wurden an Prismen ( $28,5 \times 2,5 \times 2,5 \text{ cm}^3$ ) als lineare Verkürzung ermittelt. Die Prismen für das Trocknungsschwinden lagerten bis zum Alter von einem Tag eingeschalt und abgedeckt im Feuchteschrank bei 95 % r. F. und danach im Normklima ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , 65 % r. F.). Die Prismen für das autogene Schwinden waren vom Augenblick der Herstellung an mittels Edelstahlfolie konserviert. Der Messstand für das autogene Schwinden zeichnet sich durch eine hohe Genauigkeit aus. Das Messprinzip basiert auf einer mechanischen Ankoppelung; chemisches Schwinden vor dem Erstarren des Zements wird also nicht erfasst. Die Messungen wurden in der Regel im Alter von sechs Stunden begonnen; Messwerte wurden im Abstand von fünf Minuten registriert. Temperatureinflüsse auf die Dehnung können aufgrund der geringen Querschnittsabmessung und der guten Wärmeleitfähigkeit der konservierenden Edelstahlfolie vernachlässigt werden.

**Bild V-45** zeigt das autogene, das Trocknungs- und das Gesamtschwinden eines UHPC in den ersten 14 Tagen. Das Gesamtschwinden ergibt sich aus der Überlagerung der Kurvenverläufe von autogenem und Trocknungsschwinden. Die Messungen des autogenen Schwindens wurden nach sechs Stunden begonnen, die des Trocknungsschwindens nach 24 Stunden. Der untersuchte Beton enthielt 800 kg eines Portlandzements 52,5 R-HS/NA. Der Wasserzementwert der Mischung betrug  $w/z = 0,23$ . Rechnet man den Silicastaubanteil von 16,2 M.-% v. z mit einem k-Wert von 1,0 an, ergibt sich ein äquivalenter Wasserzementwert von  $(w/z)_{\text{eq}} = 0,20$ . Die Fließmitteldosierung lag bei 3,0 % der Zementmasse, das Größtkorn bei 0,5 mm.

Die autogene Schwinddehnung nach 14 Tagen beträgt 0,6 mm/m und ist damit erwartungsgemäß größer als bei normal- oder hochfestem Beton. Der Verlauf der Verformung lässt sich in zwei Phasen aufteilen. Phase 1 von sechs bis etwa 20 Stunden zeichnet sich durch eine hohe Schwindrate aus. In Phase 2 ab 20 Stunden ist die Schwindrate deutlich geringer. Mehr als 80 % der autogenen Verformung werden bereits in Phase 1 erreicht. Besonders am Anfang dieser Phase ist die plastische Verformbarkeit des Betons jedoch noch



**Bild V-45:** Autogenes Schwinden und Trocknungsschwinden von UHPC



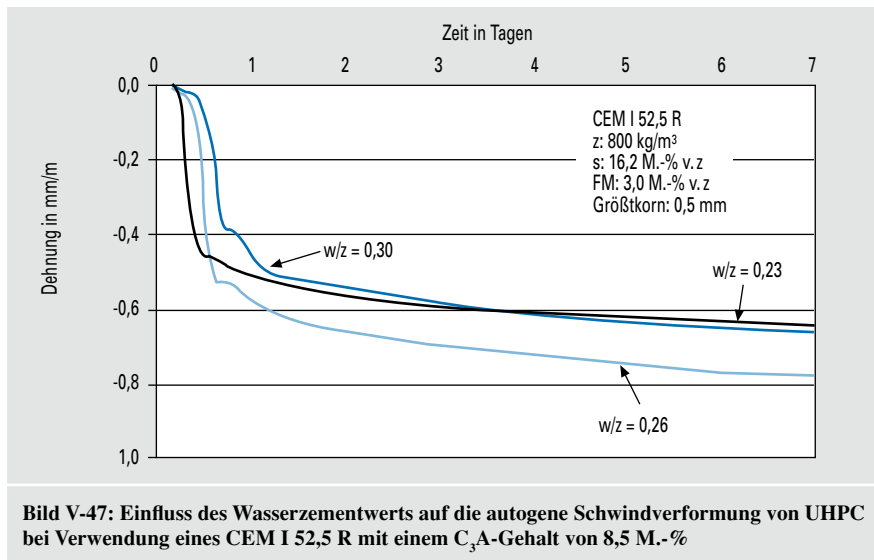
**Bild V-46:** Einfluss des Wasserzementwerts auf die autogene Schwindverformung von UHPC bei Verwendung eines CEM I 52,5 R-HS/NA

so groß, dass nur geringe Spannungen entstehen können. Erst mit fortschreitender Festigkeitsentwicklung kann es durch eine Behinderung der Schwindverformung zur Bildung von Mikro- und Makrorissen kommen.

Dass das Trocknungsschwinden trotz des sehr niedrigen Wasserzementwerts nicht vernachlässigt werden kann, zeigt ein Vergleich beider Schwindarten. Die Trockenschwinddehnung nach 14 Tagen beträgt 0,36 mm/m. Sie ist damit zwar geringer als die autogene Verformung, verursacht jedoch wegen der fortgeschrittenen Festigkeitsentwicklung bei einer entsprechenden Behinderung in vollem Umfang Spannungen. Überlagert man beide Kurven im Alter von 24 Stunden, erreicht die Gesamtverformung 0,8 mm/m und überschreitet damit die Zugbruchdehnung von unbewehrtem Festbeton (ca. 0,1 bis 0,15 mm/m) um ein Vielfaches.

Die Variation des Wasserzementwerts ergab das erwartete Ergebnis: Ein höherer Wasserzementwert führt zu einem geringeren autogenen Schwinden (**Bild V-46**). Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Selbstaustrocknungseffekt mit steigendem Wasserzementwert abnimmt. Die quantitativen Unterschiede zwischen den drei Mischungen ergeben sich dabei bereits in Phase 1 des Schwindverlaufs. Offenbar verringert die fortschreitende Entwicklung des Porensystems und der mechanischen Eigenschaften in Phase 2 den Einfluss des Wasserzementwerts auf das autogene Schwinden.

In einer weiteren Messreihe wurde der HS-Zement durch einen CEM I 52,5 R mit mittlerem  $C_3A$ -Gehalt ersetzt. Die autogene Verformung des so hergestellten UHPC ist bei allen untersuchten Wasserzementwerten deutlich höher (**Bild V-47**). Phase 1 mit hoher Schwindrate endet eini-



ge Stunden früher. Dagegen ist die Schwindrate zu Beginn von Phase 2 höher. Es werden statt 80 % nur 65 % der Verformung in Phase 1 erreicht. In diesem Fall ergibt sich das höchste Schwindmaß nicht beim niedrigsten untersuchten Wasserzementwert. Stattdessen liegt das Schwindmaß bei der Mischung mit dem Wasserzementwert  $w/z = 0,23$  in etwa so hoch wie beim Wasserzementwert  $w/z = 0,30$ . Der Ursache für dieses Ergebnis wird weiter nachgegangen.

### Ausblick

Um das Rissbildungspotenzial durch behinderte Schwindverformungen zu quantifizieren, werden im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts ringförmige Betonprobekörper hergestellt, deren Schwindverformung durch einen Stahlring behindert wird. Bei diesem Verfahren wird durch Dehnungsmessstreifen an der Innenseite des Stahlrings dessen Stauchung gemessen. Dies ermöglicht unter anderem die Bestimmung des Risszeitpunkts.

Anschließend werden unterschiedlich vorgeschädigte Probekörper durch entsprechende Lagerung auf eine mögliche Sekundärschädigung durch Treibreaktionen untersucht. Im Fokus stehen hierbei die sekundäre Ettringitbildung und die Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Außerdem wird untersucht, ob es zu einer Selbstheilung der Risse kommt.

## 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. 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.

### Braunverfärbungen

An Betonoberflächen können bei Straßenbauerzeugnissen aus erdfeuchtem Beton Braunverfärbungen auftreten. Stark ausgeprägt können sie das farbliche Erscheinungsbild beeinträchtigen und dem Produktimage schaden.

Im Berichtszeitraum hat der industrielle Gesprächskreis „Braunverfärbungen“, bestehend aus Vertretern der Zementindustrie und der Betonwarenhersteller, die komplexen stofflichen und physikalischen Ursachen für das Auftreten von Braunverfärbungen weiter geklärt. Dadurch konnte das Auftreten derartiger Verfärbungen vielfach eliminiert werden. Des Weiteren hat der Gesprächskreis „Braunverfärbungen“ ein Hinweispapier zur Verringerung des Braunverfärbungsrisikos bei Betonwaren

erarbeitet. Dieses enthält den derzeitigen Wissensstand und die vorhandenen Erfahrungen zum Thema Braunverfärbungen. Anhand einer ausführlichen Erläuterung der bislang bekannten Einflussparameter für das Entstehen von Braunverfärbungen wird aufgezeigt, wie das Braunverfärbungsrisiko vermindert werden kann. Hierzu zählen chemisch-mineralogische Einflussparameter, wie

- lösliche Eisenverbindungen Fe(II) und Fe(III),
- ein hoher pH-Wert der Porenlösung und
- komplexierende Reaktionen zwischen Eisenverbindungen und Zusatzmitteln.

Aus der Herstellung, der Nachbehandlung, der Lagerung und dem Einbau resultieren physikalische Einflussparameter, wie

- Porosität/Porengrößenverteilung,
- Feuchtebedingungen und
- Lösungstransport.

Für eine umfassende und objektive Fallanalyse, die für eine Problemlösung meist notwendig ist, enthält das Hinweispapier einen Fragenkatalog. Hiermit können im Einzelfall die relevanten stofflichen und produktionsabhängigen Parameter systematisch zusammengestellt und Maßnahmen zur Risikominderung abgeleitet werden.

Das Problembewusstsein und die Bereitschaft, im Dialog Lösungen zu finden, haben offenbar dazu geführt, dass in 2005/2006 nur noch vereinzelt über Braunverfärbungen berichtet wurde. Das Hinweispapier wird im Gesprächskreis fortgeschrieben, sobald neue Erfahrungen und Kenntnisse vorliegen.

## Verkehrswegebau ■

Vorteilhafte Eigenschaften von Betondecken im Straßenbau sind die hohe Tragfähigkeit und Verformungsstabilität, geringe Unterhaltungskosten und lange Lebensdauer sowie eine hohe Verkehrssicherheit infolge Griffigkeit und Helligkeit der Oberfläche und eine geringe Geräuschemission. Diese Kriterien gewinnen im Straßenbau vor dem Hintergrund der beginnenden Einführung von Funktionsbauverträgen bzw. PPP-Projekten, bei dem einem Bauunternehmen die Verantwortung für den Bau und die Unterhaltung einer Straße übergeben wird, und der ständig steigenden Belastung des Fernstraßennetzes im Zuge der EU-Ost-Erweiterung zunehmend an Bedeutung.



Insbesondere Fragen der Dauerhaftigkeit und der Oberflächeneigenschaften der Betonfahrbahndecken waren daher wesentliche Schwerpunkte der Aktivitäten des Forschungsinstituts im Berichtszeitraum.

### Waschbetonbauweise im Straßenbau

Die Herstellung einer Betonfahrbahndecke mit dauerhaft hoher Griffbarkeit und geringer Geräuschemission ist zu einer der wichtigsten Aufgaben im Betonstraßenbau geworden.

Bei der Herstellung der Betonfahrbahndecke muss durch den Fertiger eine ebene und gleichmäßige Oberfläche erzielt werden, um die Schwingungsanregung des Reifens und die damit verbundene Lärmemission zu verringern. Gleichzeitig muss die Oberfläche, um ausreichend griffig zu sein, eine bei der Herstellung eingeprägte Textur aufweisen. Hierdurch wird zusätzlich verhindert, dass zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche Luft komprimiert wird, die beim Abrollvorgang des Reifens mit einem Zischen entweicht. Bisher wurde in Deutschland diese Textur durch Einprägen einer Struktur in den frischen Oberflächenmörtel erzeugt, u. a. durch das Abziehen des frischen Betons in Längsrichtung mit einem Jutetuch. Vereinzelt wurde in den letzten Jahren festgestellt, dass sich die Textur durch eine mangelnde Dauerhaftigkeit des Oberflächenmörtels bereits nach vergleichsweise kurzer Verkehrsbeanspruchung so verändert hatte, dass die Griffbarkeit abnahm. Eine Alternative zur Texturierung der frischen Betonoberfläche stellt die Herstellung einer Waschbetonoberfläche dar. Hierbei wird der Oberflächenmörtel gezielt entfernt und damit der endgültige Zustand der Betonoberfläche hergestellt (**Bild V-48**). Diese Bauweise wurde in Deutschland bisher nur auf vereinzelt Versuchs- und Erprobungsstrecken eingesetzt. Dagegen werden im Ausland Fahrbahndecken aus Waschbeton mit langfristig geringer Geräuschemission und ausreichender Griffbarkeit bereits seit längerem hergestellt.

Der Einfluss unterschiedlicher Straßenoberflächen auf die Geräuschemission des Straßenverkehrs wird auf der Grundlage langjähriger Messungen ermittelt und mit bezogenen Korrekturwerten DStrO beschrieben. Gegenüber einem Referenzbelag als Bezugsbasis werden die Straßenoberflächen als leiser (-) oder lauter (+) eingestuft. Die Standardbetonbauweise nach ZTV Beton (Längstexturierung mit nachgeschlepptem Jutetuch) wurde bisher als Lärm mindernd eingestuft (DStrO-Wert



**Bild V-48:**  
Waschbeton für  
hoch belastete  
Autobahnen

von -2 dB(A)). Leiser sind nur offenporige Bauweisen. Für Waschbeton gab es bis vor kurzem noch keinen entsprechenden Korrekturwert.

Nach langjährigen Lärmmessungen an verschiedenen Waschbetondecken konnte nunmehr der Nachweis erbracht werden, dass Waschbeton ebenfalls als Lärm mindernd mit einem DStrO-Wert von -2 dB(A) einzustufen ist. Dieser Wert wurde im Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau ARS Nr. 5/2006 des Bundesministers für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung festgeschrieben. Gleichzeitig zeigten die Untersuchungen, dass Betondecken mit einer Waschbetonoberfläche eine dauerhaft hohe Griffbarkeit aufweisen. Um den Sicherheitsgewinn des Waschbetons hinsichtlich der Griffbarkeit zu nutzen, wurde daher die bisherige Standardbauweise mit Jutetuch-Längstexturierung zurückgezogen und gegen die Betondecke mit Waschbetonoberfläche ausgetauscht.

Ober- und Unterbeton werden bei der Waschbetonbauweise wie üblich eingebaut, verdichtet und geglättet. Der Oberbeton mit einem Größtkorn von 8 mm hat eine Schichtdicke von 4 bis 5 cm. Zur Herstellung der Waschbetonstruktur werden zwei Varianten angewendet. Zum einen wird ein kombiniertes Verzögerer- und Nachbehandlungsmittel aufgesprüht, das die Hydratation des Zements in der oberflächennahen Schicht verzögert und gleichzeitig das Austrocknen des frischen Betons verhindert. Alternativ hierzu wird nach dem Glätten ein Verzögerer aufgesprüht und der Beton zur Nachbehandlung mit einer Kunststoffolie abgedeckt. Sobald der Beton insgesamt ausreichend erhärtet und befahrbar ist, wird der nicht erhärtete Oberflächenmörtel maschinell ausgebürstet und entfernt. Anschließend wird zur wei-

teren Nachbehandlung ein herkömmliches Nachbehandlungsmittel aufgesprüht.

Da die Betonfahrbahn mit Waschbetonoberfläche in den Vorschriften für den Betonstraßenbau (ZTV Beton-StB 01) bislang nicht geregelt ist, wurden in dem Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau ARS Nr. 14/2006 entsprechende Anforderungen festgelegt. Der Oberbeton besteht in der Regel aus feiner Gesteinskörnung 0/2 mm sowie der Edelsplittkörnung 5/8 mm. Um langfristig gute Griffbarkeitseigenschaften der Waschbetondecken zu gewährleisten, werden an die Gesteinskörnungen erhöhte Anforderungen gestellt. Die grobe Gesteinskörnung 5/8 mm muss gebrochen sein. Die hohe Feinrauheit der vollständig gebrochenen Oberflächen verbessert die Griffbarkeit. Zusätzlich müssen die Gesteinskörnungen einen hohen Widerstand gegen Polieren aufweisen. Der Zementgehalt wird gegenüber dem normalen Straßenbeton von 340 kg/m<sup>3</sup> (TL Beton-Stb 06) auf mindestens 420 kg/m<sup>3</sup> erhöht.

Das Forschungsinstitut trägt dazu bei, die Dauerhaftigkeit der Waschbetonbauweise sicher zu stellen. In einem beantragten AIF-Forschungsvorhaben sollen gezielt Untersuchungen zum Frost-Tausalz-Widerstand und zur Vermeidung schädigender Alkali-Kieselsäure-Reaktionen durchgeführt werden. Hierbei müssen die Wirkung der Verzögerer, der erhöhte Zementgehalt und die exponierte Lage der Splittkörner beim Waschbeton berücksichtigt werden.

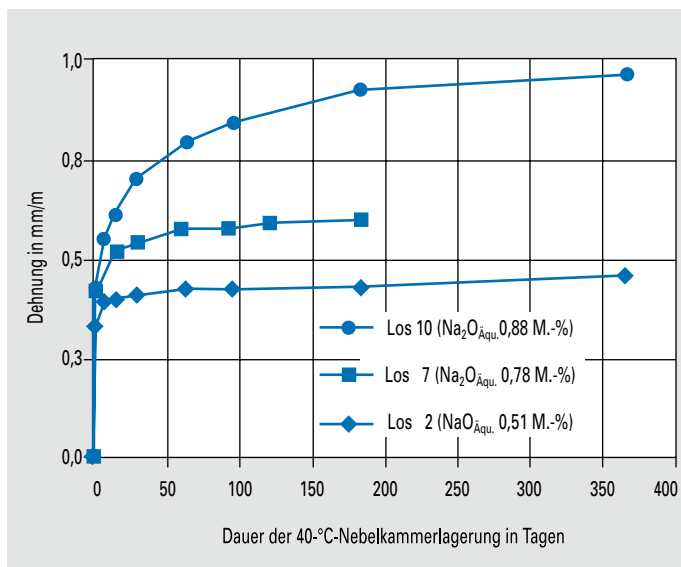
### Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Die Lebensdauer einer Betondecke beträgt im Allgemeinen mehr als 30 Jahre. Einige Betonfahrbahndecken wiesen vorzeitig Schäden auf, an deren Entstehung eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) beteiligt war (siehe Abschnitt Alkali-Kie-

**Tafel V-4: Alkaligehalt als Na<sub>2</sub>O-Äquivalent (charakteristischer Wert) von Zementen für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton**

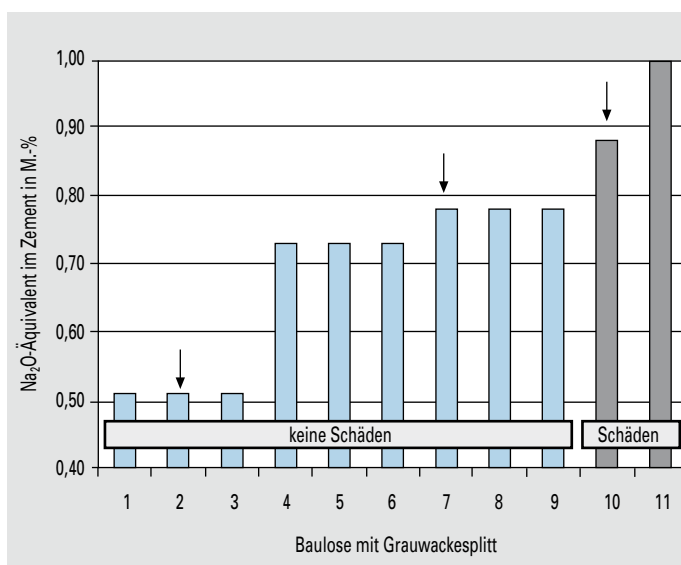
Zement	Hüttensandgehalt in M.-%	Alkaligehalt des Zements als Na <sub>2</sub> O-Äquivalent in M.-%	Alkaligehalt des Zements ohne Hüttensand bzw. Ölschiefer als Na <sub>2</sub> O-Äquivalent in M.-%
CEM I + CEM II/A		≤ 0,80	-
CEM II/B-T		-	≤ 0,90
CEM II/B-S	21 bis 29	-	≤ 0,90
CEM II/B-S	30 bis 35	-	≤ 1,00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

selsäure-Reaktion). Um vorausschauend eine hohe Sicherheit gegen eine schädigende AKR bei Betondecken zu gewährleisten, wurde im Rundschreiben ARS Nr. 12/2006 der wirksame Alkaligehalt von Straßendeckenzement gesenkt (**Tafel V-4**). Darüber hinaus wurde festgelegt, dass gebrochene Gesteinskörnungen aus Grauwacke bzw. Quarzporphyr und Kies-Edelsplitt des Oberrheins sowie importierte gebrochene und rezyklierte Gesteinskörnungen in Betonfahrbahndecken nur nach Vorlage eines Gutachtens verwendet werden dürfen, in dem für das jeweilige Lieferwerk die Eignung der Gesteine für diesen Zweck bestätigt wird. Für die Erstellung derartiger Gutachten ist neben drei weiteren Stellen auch das Forschungsinstitut der Zementindustrie zugelassen.



**Bild V-49:** Dehnung der Bohrkerne in Abhängigkeit vom Na<sub>2</sub>O-Äquivalent des verwendeten Zements und von der Dauer der 40-°C-Nebelkammerlagerung

Ob die Schäden an Autobahnen maßgeblich durch die AKR oder durch eine Überlagerung verschiedener Schadensmechanismen hervorgerufen wurden, konnte mit den bisher überwiegend an Bohrkernen durchgeführten Untersuchungen nicht festgestellt werden. In einem Forschungsvorhaben des BMVBS unter Beteiligung des FIZ soll dieser Fragestellung nachgegangen werden. Das FIZ wertete die Bauunterlagen von elf Autobahndeckenlosen der A 40 und der A 61 aus, bei deren Bau vor rund 15 Jahren inzwischen als reaktiv eingestuft Grauwackesplitt verwendet wurde. Aus einigen Deckenlosen wurden Bohrkern entnommen. Die Dehnungen der Bohrkern wurden unter verschiedenen Lagerungsbedingungen (40-°C-Nebelkammer, 60-°C-Prüfverfahren mit und ohne Alkali-Zufuhr von außen) bestimmt. Außerdem wurden Dünnschliffuntersuchungen (siehe Abschnitt Alkali-Kieselsäure-Reaktion, Petrographie) durchgeführt und die Bauunterlagen ausgewertet. **Bild V-49** zeigt die Dehnungen der Bohrkern aus den bisher nicht geschädigten Baulosen 2 und 7 sowie dem geschädigten Los 10. Beim geschädigten Los 10 wurden größere und mit zunehmender Lagerungsdauer weiter ansteigende Dehnungen bestimmt, die auf eine schädigende AKR hinweisen. Außerdem waren in den Dünnschliffen zum Teil mit Gel gefüllte Risse in den Grauwackesplitten zu erkennen. Die Laboruntersuchungen und die Auswertung der Bauunterlagen bestätigen das Praxisverhalten. Stärkere Dehnungen der Bohrkern und Schäden in der Praxis bei Verwendung von Grauwackesplitt (**Bild V-50**) traten bisher nur auf, wenn der Alkaligehalt des verwendeten Zements den heutigen, für CEM I-Zement zulässigen Wert von 0,80 M.-% überschritt. Das Forschungsvorhaben wird voraussichtlich Mitte 2007 abgeschlossen.



**Bild V-50:** Betondeckenbaulose mit und ohne Schäden bei Verwendung von gebrochenem Grauwackesplitt in Abhängigkeit des Na<sub>2</sub>O-Äquivalents des Fahrbahndeckenzements

In einem weiteren Forschungsvorhaben wird im FIZ untersucht, ob durch die Lithium-Tränkung einer AKR-geschädigten Betonfahrbahndecke die Treibreaktion zumindest verzögert und damit die Restnutzungsdauer verlängert werden kann. Nach dem Abschluss der Laborversuche Mitte 2007 wird über eine Praxisanwendung entschieden.

Durch die Verwendung von CEM II- bzw. CEM III-Zementen kann das Risiko einer schädigenden AKR vermindert werden. Diese Zemente sind für den Straßenbau zugelassen (Tafel V-4), wurden aber bisher nur selten eingesetzt. Zur Verbesserung der Akzeptanz dieser Zemente hat eine Ad-hoc-Gruppe des VDZ Arbeitskreises Verkehrsbau einen Erfahrungsbericht über die Verwendung von CEM II- bzw. CEM III-Zement im Straßenbau erstellt. Der Bericht wurde Anfang 2007 in verschiedenen Fachzeitschriften veröffentlicht.

### Regelwerke

Die Regelwerke für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln – bisher in den ZTV T-StB 95 (Fassung 2002) geregelt – und den Bau von Betonfahrbahndecken – bisher in den ZTV Beton-StB 01 geregelt – wurden komplett überarbeitet. Im künftigen Regelwerk sind alle Schichten mit hydraulischen Bindemitteln zu einem Vorschriftenwerk zusammengefasst, das neben Betondecken auch Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln umfasst. Das Regelwerk, das unter Mitarbeit des FIZ erstellt wurde, bezieht auch die aktuellen Rundschreiben zur Waschbetonbauweise und zu den Ausgangsstoffen Zement und Gesteinskörnungen ein. Der Mindestzementgehalt für Betonfahrbahndecken wurde von 350 auf 340 kg/m<sup>3</sup> gesenkt. Das Regelwerk umfasst drei Teile:

- TL Beton-StB 06 für die Lieferung der Baustoffe und Baustoffgemische,
- ZTV Beton-StB 06 für die Herstellung und
- TP Beton -StB 07 mit technischen Prüfvorschriften für sämtliche Prüfungen an den Baustoffen und Baustoffgemischen sowie an der fertigen Leistung.

### Neue Bauweisen

Im Rahmen des Forschungsprogramms „Leiser Straßenverkehr“ unter Beteiligung des FIZ wurde im September 2002 eine rund 300 m lange Dränbeton-Versuchsstrecke auf einer Bundesstraße angelegt. Die Decke liegt seit fünf Wintern unter Verkehr. Lärmmessungen der BASt zeigen die akustische Gleichwertigkeit mit offeneren Dränasphalten. Die Dauerhaf-

tigkeit ist jedoch noch nicht ausreichend. Infolge von Rissbildungen im Dränbeton wird die Versuchsstrecke voraussichtlich Mitte 2007 nach einer Liegedauer von rund fünf Jahren ausgebaut. Eine zementinterne Ad-hoc-Gruppe berät zurzeit über Verbesserungsmöglichkeiten der Bauweise. Das Programm „Leiser Straßenverkehr“ wurde 2004 abgeschlossen. In der Fortführung „Leiser Straßenverkehr 2“ ist geplant, Waschbeton-Versuchsstrecken mit dem Ziel einer weiteren Optimierung der Bauweise anzulegen.

### Eisenbahnoberbau – Feste Fahrbahn

Die hohen Anforderungen der Deutschen Bahn AG an die Lagestabilität der Gleise erfordern den Einsatz einer Festen Fahrbahn, bei der überwiegend die Betonbauweise zum Einsatz kommt. Bei der 2002 in Betrieb genommenen Neubaustrecke Köln–Frankfurt wurden verschiedene Systeme (z. B. System Rheda oder Bauart Züblin) eingebaut. Auf der 2006 in Betrieb genommenen Neubaustrecke Nürnberg–Ingolstadt wurde erstmals die Bauart System Bögl in großen Baulängen (rund 35 km) ausgeführt. Das System besteht aus im Fertigteilwerk hergestellten Betonplatten, die an der Einbaustelle auf eine hydraulisch gebundene Tragschicht aufgelegt werden. Vorteile dieser Bauweise sind die hohe Lagegenauigkeit durch Vorfertigung und genaues Einmessen der Platten und die Möglichkeit des Auswech-selns einzelner Platten im Havariefall. Die vielfältigen Entwicklungsarbeiten werden vom Arbeitskreis „Verkehrsbau“ des VDZ begleitet.

### Baulicher Brandschutz ■

Der bauliche Brandschutz ist neben dem betrieblichen und dem abwehrenden Brandschutz die wesentliche Grundlage für die notwendige Sicherheit im Brandfall. Gebaute Brandschutzmaßnahmen bestehen permanent und bieten die erforderliche Schutzwirkung, ohne dass sie durch betrieblich-mechanische Vorgänge, die ein Versagensrisiko beinhalten, ausgelöst werden müssen. Der abwehrende Brandschutz hängt vom Einsatz der Feuerwehr ab, bei dem ebenfalls ein Ausfallrisiko gegeben ist.

Mit Bauteilen aus Beton können die baulichen Brandschutzanforderungen einfach und meist ohne wesentliche Zusatzkosten erfüllt werden. Aus dem nicht brennbaren Baustoff Beton lassen sich Bauteile mit einem hohen Feuerwiderstand und einer entsprechend beständig abschirmenden

Wirkung erstellen. Das bedeutet, dass Betonbauwerke im Brandfall über lange Zeit ihre Stabilität behalten und dass das Feuer auf bestimmte Bereiche begrenzt werden kann. Diese Brandschutzwirkungen von Beton und Betonbauteilen dienen der Sicherheit der Menschen, die bei den gesetzlichen Brandschutzanforderungen höchste Priorität hat. Aber auch der Erhalt des Gebäudes selbst bzw. des Gebäudeinhalts ist aus Gründen des Sachwerteschutzes wichtig. Selbst wenn der Gesetzgeber den Sachschutz der Eigenverantwortung der Gebäudebesitzer und -nutzer übertragen hat, liegt die Sicherheit für die Sachwerte sowohl im privaten als auch im öffentlichen Interesse. Darüber hinaus leisten bauliche Brandschutzmaßnahmen auch Umweltschutz, wenn durch eine effektive Brandbegrenzung die Rauch- und Gasemissionen sowie die Löschwassermenge reduziert werden können und das meist kontaminierte Löschwasser zurückgehalten werden kann.

### Nationale Vorschriften

Da die deutschen Brandschutzvorschriften, die die Betonbauweise betreffen, in den letzten Jahren nicht bearbeitet zu werden brauchten und auch die Arbeit an den entsprechenden europäischen Vorschriften inzwischen nahezu abgeschlossen sind, brauchte sich die Betonindustrie in der Berichtszeit nicht in die nationale Vorschriftenarbeit einzuschalten. Allerdings war eine Beteiligung an der Überarbeitung der deutschen DIN 18230 „Baulicher Brandschutz im Industriebau“ erforderlich, weil hier unververtretbare Erleichterungsbestrebungen bei der Begrenzung von Brandbekämpfungsabschnitten zur Diskussion standen. Die Änderungen wurden abgelehnt.

### Europäische Zusammenarbeit

Für die Zukunft gilt, dass die Brandschutzvorschriften weitgehend auf europäischer Ebene gestaltet werden. Hierzu arbeiten in der CEMBUREAU-Arbeitsgruppe TF 5.2 „Fire Safety with Concrete“ die europäischen Verbände der Betonfertigteilindustrie (BIBM), der Transportbetonindustrie (ERMCO) und der Zementindustrie unter Beteiligung von Vertretern aus 14 Nationen zusammen.

Anfang 2007 wurde eine Broschüre in englischer Sprache mit dem Titel „Comprehensive fire protection and safety with concrete“ (Bild V-51) von der Arbeitsgruppe verabschiedet. Diese Zusammenstellung richtet sich an Planer, Bauherren, Behörden, Versicherungen und an die Allgemeinheit. Sie soll zeigen, wie und warum Beton

dazu eingesetzt werden kann, einen umfassenden Brandschutz, d. h. Personenschutz, Sachschutz und Umweltschutz, zu verwirklichen. **Bild V-52**, das der Broschüre entnommen ist, verdeutlicht, dass im Brandfall die Personensicherheit in Gebäuden mit Konstruktionen aus nicht brennbaren Baustoffen relativ hoch ist. Es ist vorgesehen, dass diese Broschüre in Deutsch für die Länder Österreich, Schweiz und Deutschland zu Marketingzwecken zur Verfügung stehen wird.



**Bild V-51: CEMBUREAU-Brandschutz-broschüre (2007)**

Die CEMBUREAU-Arbeitsgruppe TF 5.2 hat die Vorteile von Betonfahrbahndecken in Tunneln im Brandfall in einem Informationspapier zusammengetragen. Brände in Straßentunneln, bei denen erfahrungsgemäß Temperaturen über 1 100 °C entstehen, haben in den letzten Jahren in Europa viele Todesopfer gefordert. Die Schäden an den überwiegend aus Beton bestehenden Tunnelkonstruktionen blieben vergleichsweise gering. Vor allem den Feuerwehrlern hilft ein uneingeschränkt nutzbarer fester Zugang und Fahrweg. Bituminöse Beläge erweichen bei solch hohen Temperaturen und können sich entzünden und erhebliche Rauchmengen freisetzen. In Österreich besteht die Forderung, in Tunneln mit über einem Kilometer Länge Betonfahrbahndecken einzubauen. Auf europäischer Ebene wird über eine entsprechende Vorgabe diskutiert. Zurzeit wird

allerdings auf deutscher Seite eine solche Vorschrift nicht für erforderlich erachtet. In Zusammenarbeit mit den Partnern im CEMBUREAU wird auf die Durchsetzung dieser die Tunnelsicherheit erhöhenden Maßnahme in Europa und damit auch in Deutschland hingewirkt.

## Modellierung ■

Der Einsatz computergestützter Methoden in der Bauwirtschaft, zum Beispiel bei statischen Berechnungen, hat sich seit vielen Jahren bewährt. Relativ neu dagegen ist die computergestützte Simulation der Gefügeentwicklung zementgebundener Werkstoffe wie Mörtel und Beton. Dieses Werkzeug könnte dem Anwender in der Zukunft eine schnelle, zielgerichtete Auswahl der Ausgangsstoffe, insbesondere des Zements, für den jeweiligen Mörtel oder Beton ermöglichen.

### Simulation der Zementhydratation

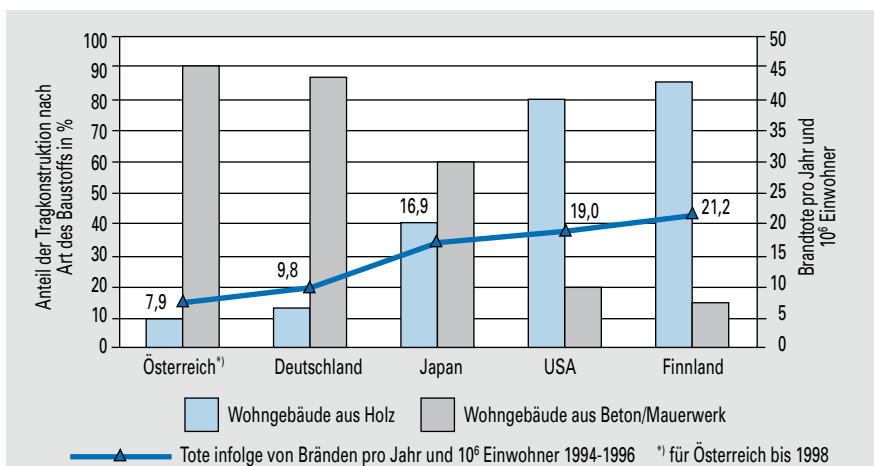
Eigenschaften von Zementstein, Mörtel oder Beton, wie zum Beispiel die Porosität oder die Festigkeit, sollen mithilfe einer Simulationsberechnung bestimmt werden. Hierfür wird zunächst ein Modell benötigt, das in der Lage ist, die Prozesse der Zementhydratation ausreichend genau zu beschreiben. Dabei müssen sowohl zeitliche als auch räumliche Änderungen im Gefüge betrachtet werden. Um die komplexen Zusammenhänge der Zementhydratation und die damit verbundene Gefügeentwicklung simulieren zu können, müssen Annahmen und Vereinfachungen für die Modellbildung und die zugehörigen Berechnungsmethoden getroffen werden.

Erst durch die Entwicklungen im Bereich der Soft- und Hardware in den letzten Jahren lassen sich entsprechend komplexe mathematische Modelle für den Baustoff Beton rechnerisch bewältigen.

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

### VCCTL-Funktionsprinzip

Für die computergestützte Simulation der Zementhydratation und der Gefügeentwicklung in VCCTL wird die Anfangsstruktur zunächst in einem definierten Volumen dargestellt. Diese volumetrische Darstellung basiert auf den Ausgangsstoffen des Zementklinkers, des Sulfatträgers und der Alkalien sowie ggf. weiterer Zementhauptbestandteile. Bei der Erstellung der Mikrostruktur werden die unterschiedlichen Partikelgrößenverteilungen und Dichten, die Anteile und Verteilung der



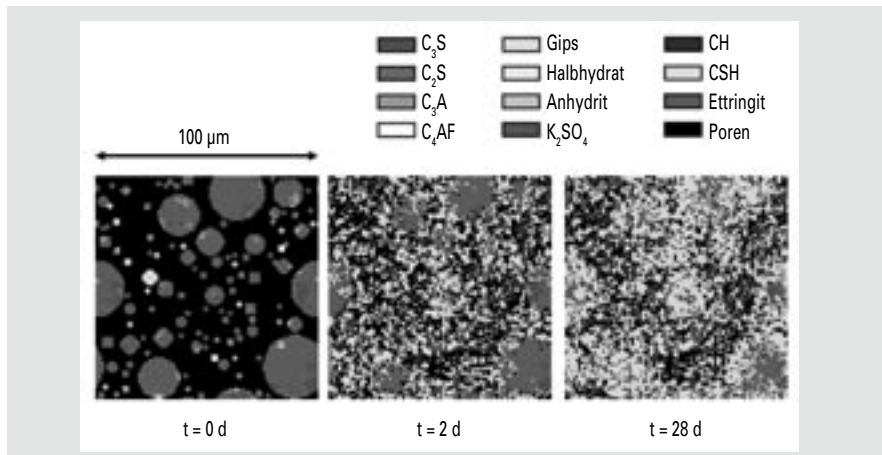
**Bild V-52: Anteile von Wohngebäuden aus Holz bzw. aus Beton/Mauerwerk in verschiedenen Ländern sowie Anzahl der Toten durch Brände pro Jahr und einer Million Einwohner nach Schneider und Oswald, TU Wien**

Phasen sowie der Wasserzementwert, der in diesem Fall den Anteil zwischen Feststoff und Porenraum bestimmt, berücksichtigt. Für die Bestimmung der notwendigen Eingabegrößen ist eine Charakterisierung der Zemente erforderlich, auf die im Anschluss genauer eingegangen wird. Es werden physikalische Größen, die chemisch-mineralogische Zusammensetzung der Bestandteile sowie bildanalytisch gewonnene Daten verwendet.

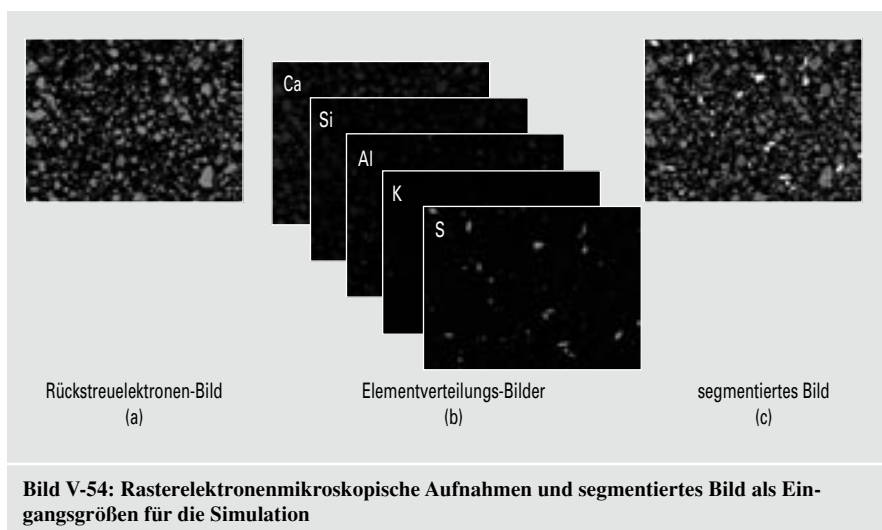
Die altersabhängige Simulation der Zementhydratation erfolgt durch Iteration bis zu einem gewünschten Endzeitpunkt beziehungsweise bis ein vorgegebener Hydratationsgrad erreicht ist. Lagerungs- und Temperaturbedingungen werden dabei berücksichtigt.

Die Zementhydratation ist in VCCTL mithilfe eines so genannten zellulären Automaten modelliert. Während eines Iterationsschritts können einzelne Volumenelemente (Voxel) mit einer partikelabhängigen Wahrscheinlichkeit in Lösung gehen. Die dabei zufällig eingeschlagene Bewegungsrichtung der freigesetzten Voxel wird als Random-Walk bezeichnet. Gemäß gegebener chemischer Reaktionsgleichungen können aufeinander treffende Voxel miteinander reagieren und entsprechende Hydratationsprodukte bilden. Mit jedem Iterationsschritt schreitet die Gefügeentwicklung voran. Anhand der berechneten hydratisierten Mikrostruktur kann dann im Folgenden die zeitliche Entwicklung sowohl der Ausgangsstoffe und der Hydratationsprodukte als auch des Porenraums dargestellt und können so Rückschlüsse auf Gefügeentwicklung und Festigkeit gezogen werden.

Beispielhaft zeigt **Bild V-53** zu ausgewählten Zeitpunkten die Gefügeentwicklung infolge Hydratation eines Zementsteins. Es wurde ein Portlandzement CEM I 42,5 R mit einem Wasserzementwert von 0,50 verwendet. Der Simulationsberechnung liegt eine Wasserlagerung der virtuellen Zementsteinprobe bei 20 °C zugrunde. Der Hydratationsprozess zeigt deutlich die Auflösung der Zementpartikel und die zunehmende Ausbildung eines Mikrogefüges. Die Ergebnisse aus der Simulationsberechnung können mit experimentellen Untersuchungen verglichen werden. Anhand dieses Vergleichs kann die Simulationsberechnung kontrolliert bzw. kalibriert werden.



**Bild V-53:** Gefügeentwicklung im Zementstein infolge des Hydratationsprozesses (Simulationsbilder)



**Bild V-54:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen und segmentiertes Bild als Eingangsgrößen für die Simulation

### Charakterisierung des Zements

Basis der Simulation mit VCCTL ist die Charakterisierung der zu untersuchenden Zemente. Sie wird mithilfe experimenteller Bestimmungsmethoden durchgeführt. Zur chemisch-mineralogischen Zusammensetzung zählen die einzelnen Bestandteile des Zements, das heißt zum Beispiel Kalkstein, Hüttenessand oder Flugasche, die Klinkerphasen sowie die Sulfat- und Alkaligehalte. Physikalische Größen wie die Mahlfineinheit und die Partikelgrößenverteilung werden ebenfalls bestimmt. Neben den experimentellen Verfahren werden bildanalytische Verfahren zur Charakterisierung der Zemente angewendet.

Aufnahmen des Zements aus der Rasterelektronenmikroskopie (REM) und die zugehörigen Analysedaten werden dazu in die Datenbank des VCCTL-Programms aufgenommen. Die Digitalbilder aus der REM, wie sie in den **Bildern V-54 a** und **V-54 b** zu sehen sind, müssen dafür verarbeitet werden. Die Bildverarbeitung umfasst die Bearbeitung und die Auswertung

der Aufnahmen. Farbtransformationen, Verbesserungen des Kontrasts sowie die Anwendung von Filtern können als Vorarbeiten zur Erleichterung der späteren Segmentierung durchgeführt werden.

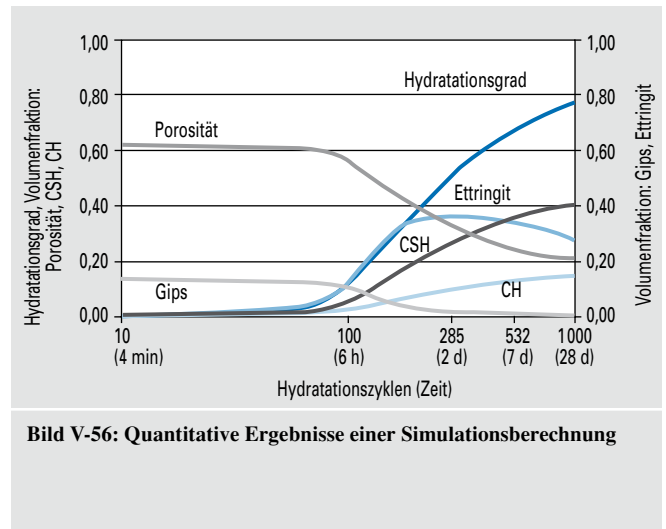
Mit der Segmentierung beginnt die Bildauswertung. Sie ermöglicht für die Simulation eine realitätsnahe Darstellung des zu hydratisierenden Zements. In VCCTL wird zur Segmentierung ein Pixel-orientiertes Schwellenwertverfahren angewendet. Ein Pixel stellt dabei das kleinste Bildelement dar. Je nach Höhe der Schwellenwerte kann ein Pixel einem oder mehreren Elementen zugeordnet werden (z. B. Ca und Al). Aus der Kombination der Elemente ergibt sich der pixelbezogene resultierende Zementbestandteil (z. B. C<sub>3</sub>A). Im Folgenden werden gleichartige Pixel entsprechend ihrer Lage in der REM-Aufnahme zu größeren Objekten zusammengefasst.

Die Qualität der Segmentierung kann über den visuellen Vergleich des erzeugten segmentierten Bilds (**Bild V-54 c**) mit dem

	Werk						
	A	B	C	D	E	F	G
32,5 R		■ □					■ □
42,5 R	□	■ □	□	□	□ ■	■ □	
42,5 R-HS					□ ■		
52,5 N						□	
52,5 R		■ □				■ □ □	
52,5 R-NA				■			
52,5 R-HS/NA				■			

■ Festigkeit      ■ Alkaligehalt      □ Zusatzmittel  
 □ Erhärtung      □ Rohstoffe      ■ C<sub>3</sub>A-Gehalt

**Bild V-55: Übersicht der Portlandzemente und Versuchsparameter zur Berechnung der Zementnormdruckfestigkeit anhand von Klinkerkerndaten**



Rückstreuerelektronenbild aus der Mikroskopie kontrolliert werden. Im Rückstreuerelektronenbild können aufgrund des Kontrasts der einzelnen Graustufen bereits relativ viele Phasen voneinander unterschieden werden. Eine quantitative Kontrollmöglichkeit ist durch die Daten aus der Röntgenbeugungsanalyse mit anschließender Rietveld-Verfeinerung gegeben.

Aus dem nun vorhandenen segmentierten Bild können Daten wie zum Beispiel Aussagen zu Volumen-Oberflächenverhältnissen ermittelt werden. Hierzu wird die Größe der Partikel durch die Bestimmung der Anzahl der zusammenhängenden gleichartigen Pixel bestimmt. Daraus ergeben sich die Volumenanteile der einzelnen Phasen. Betrachtet man jeweils lokale Nachbarschaften, dann können dadurch Randzonen der Partikel und somit die Oberflächenanteile ermittelt werden. Diese Daten dienen als Eingangsgrößen für die Simulationsberechnung.

### Aktuelles Forschungsvorhaben

Im Rahmen eines AiF-Forschungsvorhabens werden im Forschungsinstitut zurzeit Untersuchungen zur Bestimmung der Normdruckfestigkeit von Zement anhand von Klinkerkerndaten mithilfe der VCCTL-Software durchgeführt. Dabei wird die Simulation der Zementhydratation zum einen dazu eingesetzt, Entwicklungspotenziale zementgebundener Werkstoffe und Modellierungsmöglichkeiten aufzuzeigen, wobei aufwendige experimentelle Untersuchungen auf ein notwendiges Maß beschränkt werden können. Zum anderen ist es Ziel, bereits anhand der üblichen Kenndaten des Klinkers, die zur Produktionssteuerung eingesetzt werden,

die 28-Tage-Normdruckfestigkeit vorherzubestimmen.

Dazu werden in einem ersten Schritt zunächst Portlandzemente CEM I unterschiedlicher Herkunft, Festigkeitsklasse etc. untersucht. **Bild V-55** gibt einen Überblick der bisher ausgewählten Portlandzemente und der Variation der Versuchsparameter.

Die Zemente wurden, wie zuvor erläutert, chemisch-mineralogisch, physikalisch und bildanalytisch charakterisiert, sodass Inputdaten für die Simulationsberechnung vorliegen. Ferner wurde mit den im Labor durchzuführenden experimentellen Untersuchungsreihen begonnen. Im Rahmen der Laboruntersuchungen werden zum Beispiel die Hydratationswärmeentwicklung, die Porosität und die Festigkeitsentwicklung bestimmt.

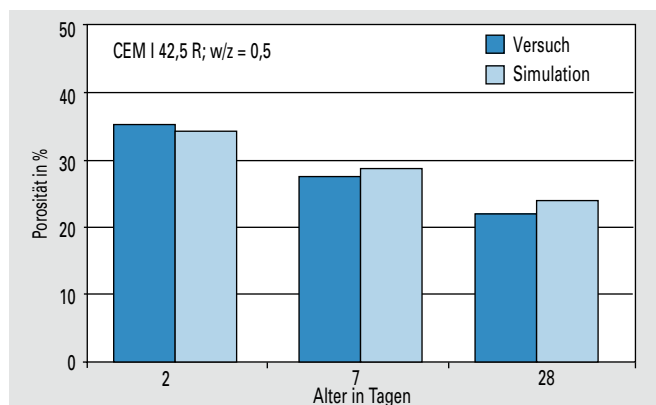
Mit den Inputdaten aus der Zementcharakterisierung wurden Simulationsberechnungen mithilfe der VCCTL-Software durchgeführt. Als Ergebnis liegen für die unterschiedlichen Zemente Daten über die altersabhängige Gefügeentwicklung und Phasenverteilung vor. Auf dieser Datenbasis ist es möglich, z.B. den Erstarrungsbeginn und die Festigkeitsentwicklung zu bestimmen. Weiterhin werden Eigenschaften der hydratisierten Matrix wie zum Beispiel der Hydratationsgrad, das chemische Schwinden, die Hydratationswärmeentwicklung, der pH-Wert der Porenlösung und die Kapillarporosität errechnet. **Bild V-56** zeigt exemplarisch in Abhängigkeit von der Anzahl der Berechnungszyklen die zeitliche Entwicklung des Hydratationsgrades, der Porosität und der

Volumenanteile an Calciumsilikathydraten (CSH), Calciumhydroxid (CH), Gips und Ettringit. Die für die Simulation verwendeten Berechnungszyklen (Iterationsschritte) können mithilfe empirischer Zusammenhänge in eine zeitbezogene Darstellung umgewandelt werden. Diese zeitbezogene Darstellung erlaubt den Vergleich zwischen rechnerisch und experimentell ermittelten Kenngrößen.

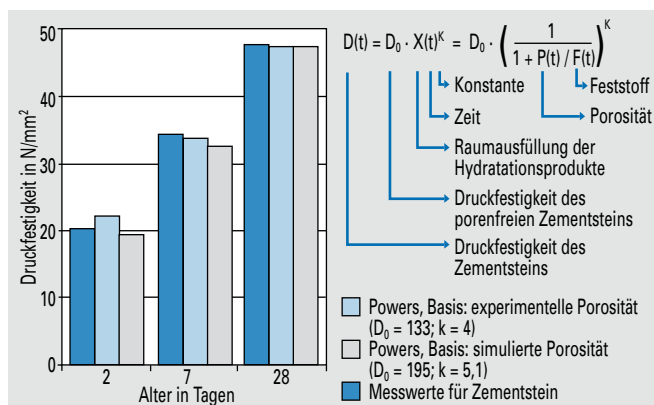
### Porosität und Druckfestigkeit

Für den Vergleich zwischen rechnerisch und experimentell ermittelten Kenngrößen bietet sich z. B. die Verwendung der Porosität bzw. die daraus ableitbare Druckfestigkeit an. Experimentell wurde die altersabhängige Porosität von Zementstein und Normmörtel mit der Quecksilberdruckporosimetrie bestimmt. **Bild V-57** zeigt die mit VCCTL berechnete Porosität im Vergleich zu den experimentell ermittelten Werten für einen Zementstein mit einem Wasserzementwert von  $w/z = 0,50$ . Für die untersuchten Zeitpunkte im Alter von 2, 7 und 28 Tagen ergaben sich gute Übereinstimmungen der experimentell und der mit VCCTL berechneten Porositäten.

Mithilfe der so ermittelten Porositäten wurden im Folgenden Druckfestigkeiten unter Verwendung des „Powers-Ansatzes“ bestimmt. Der Powers-Ansatz (**Bild V-58**) geht von der theoretischen Festigkeit eines porenfreien Gefüges aus, die entsprechend der enthaltenen Porosität abgemindert wird. In der Powers-Gleichung stellt  $D_0$  die Druckfestigkeit des porenfreien Zementsteins dar. Die experimentellen Werte der Druckfestigkeit wurden an Normmörtelprismen mit den Abmessungen  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  nach DIN EN 196 ermittelt.



**Bild V-57: Altersabhängige Porosität des Zementsteins – Vergleich von Versuchs- und Simulationsergebnissen**



**Bild V-58: Druckfestigkeit von Zementstein berechnet mithilfe der Powers-Gleichung; a) mit experimentell gemessenen Porositäts-werten; b) mit Porositäts-werten aus der Simulation im Vergleich zu experimentell ermittelten Druckfestigkeiten**

Bild V-58 zeigt für einen Portlandzement CEM I 42,5 R mit einem Wasserzementwert von  $w/z = 0,50$  die experimentell bestimmte Druckfestigkeit im Vergleich zu den aus den Porositäten mithilfe des Powers-Ansatzes berechneten Druckfestigkeiten. Auch hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung von Laborprüfung und Berechnung.

Der Zusammenhang zwischen der Normdruckfestigkeit und der Festigkeit des Zementsteins wird unter anderem von der Gefügeausbildung in der Kontaktzone zwischen Normsand und Zementstein beeinflusst. Hierzu werden weitere empirische Modelle zur Berücksichtigung von Normsand bei der Druckfestigkeitsberechnung überprüft. Dabei sollen unter anderem Modelle zur Berücksichtigung der Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der Porosität herangezogen werden. In welcher Form die Auswirkung von Normsand bei der Simulation mit VCCTL berücksichtigt werden kann, ist ebenfalls Teil des zurzeit laufenden Forschungsvorhabens.

## Normung ■

Nach der bauaufsichtlichen Einführung der Betonnormen DIN EN 206-1 und DIN 1045 im August 2002 und dem Ende der Übergangsfrist am 31.12.2004 ist der Generationswechsel innerhalb der Normenreihe für den Betonbau vollzogen. Die Normen werden in der Praxis angewendet. Mit einer A1-Änderung war DIN 1045-2 zum Ende der Übergangsfrist technisch und formal auf den neusten Stand gebracht worden. Diese Normergänzung war notwendig geworden, 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

Im Berichtszeitraum wurde eine weitere Ergänzung zu DIN 1045-2 erarbeitet. Die Änderungen ergaben sich aus den bei der Anwendung von DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 gemachten Erfahrungen, die weitere Fortschreibung europäischer und nationaler Produktnormen für Betonausgangsstoffe sowie deren Anwendungsregeln und neuen Forschungsergebnissen.

### A2-Änderung zur Betonnorm DIN 1045-2

Zu Beginn des Jahres 2007 wurde auf Basis der Ergebnisse einer Forschungsarbeit an den Technischen Universitäten in Aachen und München mit der Ergänzung A2 zur DIN 1045-2 die Anrechnung von Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff in Beton bei Frost-Tausalz-Angriff (Expositionsklassen XF2 und XF4) erlaubt. In diesem Zusammenhang wird auch die Anwendung flugaschehaltiger Zemente in diesen und weiteren Expositionsklassen nicht mehr ausgeschlossen. So war bisher bei Verwendung von Portlandflugaschezement CEM II/A-V oder Portlandkompositzement CEM II/A-M (P-V) in Beton für die Expositionsklasse XF3 eine Anrechnung von Flugasche als Betonzusatzstoff auf den Wasserzementwert und den Mindestzementgehalt nicht zulässig. Diese Einschränkung entfällt ebenso wie die Anwendungsbeschränkungen des CEM

II/A-V in den Expositionsklassen XF2 und XF4 sowie des CEM II/B-V in den Expositionsklassen XF2, XF3 und XF4. Weiterhin können nun auch die Zemente CEM II/A-M (S-V, V-T, V-LL) und CEM II/B-M (S-V, V-T) ohne Anwendungsbeschränkungen in Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 verwendet werden. Bei den Zementen CEM II/B-M (D-V) und CEM II/B-M (P-V) entfällt der Anwendungsausschluss für die Expositionsklasse XF3. Wird Flugasche als Hauptbestandteil in Portlandkompositzementen eingesetzt, können höhere Flugaschegehalte als in der Verwendung als Betonzusatzstoff realisiert werden, da durch die Optimierung der Zementeigenschaften ein praxisgerechtes Leistungsniveau im Beton eingestellt wird. Untersuchungen des Forschungsinstituts im Rahmen der AiF-Forschungsförderung bestätigen dieses. Dabei wurden wegen der bislang bestehenden Anwendungsbeschränkungen für flugaschehaltige Zemente schwerpunktmäßig Frost- und Frost-Tausalz-Versuche durchgeführt. Ergänzend wurde aber z. B. auch das Carbonatisierungsverhalten der Betone untersucht (vgl. Abschnitt „Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen“).

### Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff

Für Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff erschien Ende des Jahres 2006 die harmonisierte europäische Norm DIN EN 15167. Die Norm wurde in Anlehnung an die Normen bzw. Normentwürfe für die Betonzusatzstoffe Flugasche und Silicastaub in zwei Teile untergliedert:

- Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien
- Teil 2: Konformitätsbewertung

In Deutschland darf Hüttensandmehl erst dann im bauaufsichtlich relevanten Bereich angewendet werden, wenn hierfür entsprechende Regelungen eingeführt wurden.

Während die Herstellung und Verwendung hüttensandhaltiger Zemente in Deutschland eine lange und erfolgreiche Tradition hat, wird Hüttensandmehl (HSM) als Betonzusatzstoff praktisch nicht eingesetzt. In einigen europäischen Ländern, z.B. in Großbritannien, wird HSM auch im Hoch- und Ingenieurbau als Betonzusatzstoff verwendet. Diese Erfahrungen können jedoch nicht ohne Weiteres auf Deutschland übertragen werden. Der Vorstand des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) hat deshalb beschlossen, zunächst keine Anwendungsregeln für Hüttensandmehl im Beton zu erstellen. Er empfiehlt, Anwendungszulassungen beim DIBt zu beantragen. Erst wenn Erfahrungen aus einer ausreichenden Zahl von Zulassungen vorliegen, können hierauf aufbauend Anwendungsregeln erarbeitet werden, die in Zukunft in die Betonnorm einfließen.

Mit der Anwendung hüttensandhaltiger Zemente liegen in Deutschland umfangreiche Erfahrungen auch im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit der mit diesen Zementen hergestellten Betone vor. Unter den Randbedingungen der europäischen Norm für HSM DIN EN 15167-1 wird dieser Erfahrungsbereich verlassen, wenn keine weiteren Anforderungen an das HSM gestellt werden. Die Norm für Hüttensandmehl definiert ein Leistungsniveau, das unter demjenigen liegt, das bei der Herstellung hüttensandhaltiger Zemente in Deutschland vorausgesetzt werden kann. Dieses betrifft die Feinheit, den Glasgehalt und den Festigkeitsbeitrag des HSM. Darüber hinaus liegen keine Erfahrungen in Deutschland mit so genannten pelletierten, d.h. mit

Luft abgekühlten Hüttensanden vor. In der Praxis erfolgt heute eine enge Zusammenarbeit zwischen Zementhersteller und Hüttensandlieferant. Darüber hinaus werden durch die Eigenüberwachung der Hüttensande durch den Zementhersteller Qualitätsschwankungen in den chemischen und physikalischen Eigenschaften der Hüttensande erkannt und durch geeignete Maßnahmen bei der Zementherstellung ausgeglichen. Den Zementherstellern stehen dabei vor allem folgende Maßnahmen zur Verfügung:

- Abstimmung der Feinheiten von Klinker und Hüttensand (in gemeinsamer oder getrennter Vermahlung)
- Optimierung der Rezeptur (Erhöhung bzw. Verminderung des Hüttensandanteils)
- Steuerung von Menge und Zusammensetzung des Sulfatträgers

Die deutschen Zementhersteller haben sich ihr Know-how der zielsicheren Aussteuerung der Eigenschaften hüttensandhaltiger Zemente in jahrzehntelanger praktischer Erfahrung erarbeitet. Welche der Steuerungsgrößen bei Verwendung von HSM als Betonzusatzstoff in der Praxis der Betonherstellung in Deutschland umsetzbar wären und ob ein der Anwendung hüttensandhaltiger Zemente vergleichbares Maß an Flexibilität und Sicherheit erreicht werden könnte, ist bisher aufgrund mangelnder Erfahrungen nicht bekannt.

Als Anwendungsregel für HSM als Betonzusatzstoff kommen grundsätzlich zwei Konzepte in Frage:

- k-Wert-Konzept
- Prinzip der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit

Das k-Wert-Konzept wird für HSM als Betonzusatzstoff z.B. in Schweden und Frankreich angewendet (**Tafel V-5**). In Deutschland gilt die Eignung des k-Wert-Konzepts bislang nur für Flugasche und Silicastaub als nachgewiesen. Das Prinzip der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit kann in Deutschland nach DIN 1045-2, Anhang E nur im Rahmen allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassungen angewendet werden. Derartige Zulassungsverfahren wurden bisher nicht durchgeführt. Zulassungen von Betonen, die von DIN 1045-2 abweichen, wurden vielfach erteilt (z.B. für Massenbetone); ebenso Anwendungszulassungen für Portlandkompositzemente. Für die Zulassung der genormten Zemente zur Anwendung in bestimmten Expositionsklassen war ein umfangreiches Versuchsprogramm mit Prüfungen zum Carbonatisierungsverhalten, Prüfungen zum Widerstand gegenüber dem Eindringen von Chloriden, Prüfungen zum Frostwiderstand sowie Prüfungen zum Frost-Tausalz-Widerstand durchzuführen. Die Ergebnisse der Zulassungsprüfungen wurden durch den zuständigen Sachverständigenausschuss (SVA) des DIBt bewertet. In der Zulassung wurden ggf. über die Norm hinausgehende Anforderungen festgelegt. Eine vergleichbare Vorgehensweise ist für allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen nach Anhang E der DIN 1045-2 zu erwarten. Die Formulierung einer Anwendungsregel ausschließlich über einen Festigkeitsnachweis ohne eine entsprechende Absicherung der Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen ist nicht möglich.

Der VDZ hat gemeinsam mit der Transportbetonindustrie und der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken unter Einbeziehung des Centrum Baustoffe und Materialprüfung der Technischen Universität München (Prof. Heinz) und des Instituts für Bauforschung der RWTH Aachen (Prof. Brameshuber) einen Sachstandbericht erarbeitet. Der Sachstandbericht zeigt neben den dokumentierten Erfahrungen mit Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff auch den notwendigen Forschungsbedarf und Konzepte für Anwendungsregeln auf. Der Bericht wird im Laufe des Jahres 2007 in der Schriftenreihe des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) erscheinen.

**Tafel V-5: Verwendung von Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff mit k-Wert-Konzept im Rahmen nationaler Anhänge zur europäischen Betonnorm EN 206-1**

Land	Zementart	k-Wert	ergänzende Erläuterungen
Österreich	CEM I CEM II	0,8 0,8	–
Belgien	CEM I	0,9	$HSM/(z + HSM) \leq 0,31$ $HSM/(z + HSM) \leq 0,17$ bei Außenbauteilen
Finnland	alle	0,8	$k = 1,0$ bei XA (chemischer Angriff)
Frankreich	CEM I	0,9	max. $HSM/(z + HSM) = 0,30$ abhängig von Umgebungsbedingungen
Norwegen	CEM I, II, III abhängig von Umgebungsbedingungen	0,6	Mindestzementgehalt: $(z + k \cdot HSM) > \min z$
Schweden	CEM I, CEM II	0,6	$HSM/(z + HSM) \leq 0,34$



### Zukünftige Entwicklung in der europäischen Betonnormung

Nach den CEN-Regularien ist alle fünf Jahre die routinemäßige Überprüfung einer CEN-Norm vorzunehmen. Für die europäische Betonnorm EN 206-1 wäre diese Überprüfung im Jahre 2005 notwendig gewesen. Da die Norm jedoch in vielen Mitgliedsländern zu diesem Zeitpunkt erst kurzfristig und in einigen Mitgliedsländern noch gar nicht in Anwendung war, lagen mit der Norm erst wenige Erfahrungen vor. Daher wurde eine Überarbeitung vor dem Jahr 2010 vom CEN/TC 104 „Beton und zugehörige Produkte“ nicht als sinnvoll erachtet. Diese Auffassung wurde bei den CEN-Sitzungen in Larnaca im November 2005 durch entsprechende Resolutionen bestätigt. Den Mitgliedern wurde empfohlen, bei entsprechenden Umfragen durch das CEN demgemäß zu antworten. Ferner ist es nach CEN-Regularien nicht möglich, weitere Normenänderungen an EN 206-1 vorzunehmen, ohne die Veröffentlichung einer neuen Ausgabe durchzuführen, da bereits zwei Ergänzungen (Amendments) vorliegen. CEN/TC 104 geht davon aus, dass die EN 206-1 in ihrer jetzigen Form unter Berücksichtigung der bereits erfolgten zwei Änderungen keine wesentlichen Mängel mehr aufweist.

Im Berichtszeitraum hat eine Arbeitsgruppe des CEN/TC 104/SC1 „Beton“ eine Synopse der nationalen Anhänge (NAD) zur europäischen Betonnorm EN 206-1 erarbeitet. Diese Synopse hat verdeutlicht, dass eine weitere Harmonisierung insbesondere der dauerhaftigkeitsrelevanten Festlegung praktisch nicht möglich ist. Aus den Übersichten geht z.B. hervor,

dass einige Länder weder hinsichtlich des maximalen w/z-Werts noch hinsichtlich des Mindestzementgehalts Einschränkungen für Innenbauteile haben. Der überwiegende Teil der NAD legt zwar Werte fest, teilweise aber auf sehr unterschiedlichem Niveau. Viele Länder fordern eine Mindestdruckfestigkeit des Betons. Fünf Länder haben keine Anforderungen formuliert. Die für Innenbauteile am häufigsten definierte Expositionsklasse ist XC1, einige Länder haben die Klassen X0 bzw. XC3 vergeben. Außenbauteilen wird in mehreren Mitgliedsstaaten eine Kombination aus den Expositionsklassen XC4 und XF1 zugeordnet. Anforderungen an die Mindestdruckfestigkeit sind entweder nicht gegeben oder liegen zwischen C25/30 und C32/40. Der maximale w/z-Wert wird mit 0,60 bis 0,50 angegeben. Der Mindestzementgehalt bewegt sich zwischen 150 bis 320 kg/m<sup>3</sup>. Ebenfalls bestehen zum Teil deutliche Unterschiede für die Zementanwendung. Hier spiegeln sich neben den traditionell unterschiedlichen Gegebenheiten des Markts und der Baupraxis ebenfalls Philosophien der Regelsetzung wider (**Tafel V-6**). Während in der deutschen Anwendungsnorm DIN 1045-2 für alle 27 Grundzementarten und zusätzlich eine Reihe von CEM II-M-Zementen Festlegungen für deren Anwendung getroffen wurden, regeln andere NAD die Anwendung nur einiger weniger Zementarten, die traditionell im jeweiligen nationalen Markt eine Rolle spielen.

Zur Vorbereitung einer weiteren Überarbeitung der EN 206-1 werden verschiedene Arbeitsgruppen Vorschläge zu den folgenden Themen erarbeiten:

- Hinweise zur richtigen Zuordnung von Expositionsklassen (informativ)
- Aufnahme des selbstverdichtenden Betons
- Vereinheitlichungspotenzial der Dauerhaftigkeitsanforderungen
- Zusatzstoffe (Vereinheitlichung des Anwendungskonzepts)
- Überprüfung der Konformitätsregeln

### Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton: WU-Richtlinie des DAfStb

Die Anwendung von wasserundurchlässigem Beton wird in Deutschland seit Ende 2003 durch eine Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) geregelt. Damit wurde eine Lücke im Regelwerk der Bauwerksabdichtungen nach DIN 18195 geschlossen, die sich im Wettbewerb häufig als Nachteil für die Betonbauweise auswirkte. Inzwischen sind als Heft 555 des DAfStb die Erläuterungen zur Richtlinie erschienen. Zweck dieser Erläuterungen ist es, dem Anwender den Hintergrund der Regelungen verständlich zu machen und weitere Detailinformationen zu liefern.

Die WU-Bauweise mit Beton (**Bild V-59**) hat sich in der Vergangenheit als robuste und dauerhafte Konstruktion auch bei hohen Nutzungsanforderungen bewährt. Strittig im Zusammenhang mit dem Einsatz von WU-Konstruktionen aus Beton bei erhöhten Anforderungen an die Raumnutzung ist häufig die Frage nach den abgegebenen Feuchtemengen und dem Feuchtetransport durch die Bauteile. Hierzu wurde durch den DAfStb ein Positionspapier verfasst, das den Stand der Technik widerspiegelt

**Tafel V-6: Vergleich der Anwendungsregeln für Zemente im Rahmen nationaler Anhänge zur europäischen Betonnorm EN 206-1 am Beispiel eines Außenbauteilbetons**

Land	max (w/z) <sub>eq</sub>	min z in kg/m <sup>3</sup>	CEM I	CEM II						CEM III		CEM IV		CEM V	
				S		LL		M		A	B	A	B	A	B
				A	B	A	B	A	B						
Österreich	0,55	300	x	x	x				(x)	x	(x)				
Belgien	0,55	300	x	x	x	x	x	x	x	x	x			(x)	
Dänemark	0,55	150	(x)			(x)									
Finnland	0,60	270	x	x	x	x		x		x	x				
Deutschland	0,60	280	x	x	x	x	○	(x)	(x)	x	x	○	(x)	(x)	(x)
Irland	0,60	300	x												
Italien	0,50	320	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Niederlande	0,55	300	x	x	x	(x)	(x)	(x)	(x)	x	x	(x)	(x)	(x)	(x)
Norwegen	0,60	250	x	x		x									
Großbritannien	0,60	280	x	x	x	x				x	x	(x)	(x)		

x	erlaubt		nicht erwähnt
(x)	mit Einschränkungen	○	nicht erlaubt



Bild V-59: Errichtung einer „Weißer Wanne“ (Wasserundurchlässiger Beton)

(erschieden in: beton 56 (2006) H. 10, S. 470-471). In diesem Positionspapier wurde nochmals deutlich dargestellt, dass „die Anforderungen der WU-Richtlinie so festgelegt wurden, dass während der Nutzung lediglich die im Beton enthaltene Baufeuchte an den Innenraum abgegeben wird. Die bei anstehendem drückenden Wasser nachtransportierten und an die Innenluft abgegebenen Feuchtemengen durch den WU-Beton sind vernachlässigbar gering im Vergleich zu den Feuchtigkeitsmengen, die sich durch Kondensation – z. B. infolge falschen Lüftungsverhaltens im Sommer – auf kühlen Bauteiloberflächen niederschlagen. Die Feuchte Kondensation auf den Bauteiloberflächen muss durch ein angemessenes Lüftungsverhalten bzw. durch zusätzliche bauphysikalische Maßnahmen ausgeschlossen werden und darf nicht der WU-Konstruktion zugeschrieben werden. Eine zusätzliche rückwärtige Abdichtung des Betons ist nicht erforderlich, da diese zur Vermeidung des Nachtransports von Feuchte wirkungslos ist.“

### DAfStb-Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“ – Änderungen durch Einführung europäischer Produktnormen

Die Instandsetzungsprinzipien für Betonbauteile sind für Deutschland in der Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“ (Instandsetzungs-Richtlinie) des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) beschrieben.

In der neuen Normenreihe EN 1504 „Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken –

Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität“ werden die Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken europäisch geregelt. Die Normenreihe EN 1504 besteht aus den Teilen:

- 1 Definitionen
- 2 Oberflächenschutzsysteme für Beton
- 3 Statisch und nicht statisch relevante Instandsetzung
- 4 Kleber für Bauzwecke
- 5 Injektion von Betonbauteilen
- 6 Mörtel zur Verankerung der Bewehrung oder zum Ausfüllen von äußeren Hohlräumen
- 7 Vermeidung von Korrosion der Bewehrung
- 8 Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität
- 9 Prinzipien für die Anwendung von Produkten und Systemen
- 10 Anwendung von Produkten und Systemen auf der Baustelle, Qualitätsüberwachung der Ausführung

Die Teile 2 bis 7 der Normenreihe sind mandatiert und somit harmonisierte Normen. Im Amtsblatt der Europäischen Kommission wurden im Juni 2005 bereits drei harmonisierte europäische Normen für Betoninstandsetzungsprodukte veröffentlicht. Es handelt sich hierbei um die EN 1504-2 „Oberflächenschutzsysteme für Beton“, die EN 1504-4 „Kleber für Bauzwecke“ und die EN 1504-5 „Injektion von Betonbauteilen“.

Zur Anwendung der in der Normenreihe EN 1504 definierten, europäisch harmonisierten Bauprodukte im bauaufsichtlich relevanten Bereich werden so genannte

Rest- bzw. Anwendungsnormen erstellt. Durch diese Normen wird die Anwendung in dem bisher durch die Richtlinie des DAfStb definierten Rahmen sichergestellt. Der Ausgang des Europäischen Normungsverfahrens mit rund 90 zugehörigen Prüfnormen ist derzeit noch nicht ganz absehbar. Einige Prüfnormen befinden sich noch in der CEN-Umfrage und liegen somit nur im Entwurf vor. Die Mehrzahl der Prüfnormen ist aber bereits veröffentlicht oder zur formellen Abstimmung vorgelegt. Die so genannte Koexistenzperiode, in der sowohl die bauaufsichtlich eingeführten neuen europäischen Regelwerke in Kombination mit den entsprechenden nationalen Anwendungsnormen als auch die derzeit gültige Instandsetzungs-Richtlinie des DAfStb Gültigkeit besitzen, wurde bis zum 01.01.2009 verlängert. Ab diesem Zeitpunkt ist der Teil 2 der Richtlinie, der die Produkthanforderungen regelt, zurückzuziehen und die europäischen Regelwerke sind in Kombination mit den entsprechenden nationalen Anwendungsnormen anzuwenden.

Während das deutsche Regelwerk derzeit die Verwendung von Betoninstandsetzungssystemen beschreibt, definieren die europäischen Normen nur die Ausgangsprodukte. Daher muss auf nationaler Ebene geregelt werden, wie aus den einzelnen Komponenten sichere Systeme entstehen. Aus diesem Grund werden in den zuständigen Gremien so genannte Systemnormen erarbeitet, in denen „Instandsetzungs-Bausätze“ definiert werden. Für die bereits veröffentlichten Produktnormen wurde die Brücke zwischen europäischer Stoffnorm und nationalen Anforderungen aus der Instandsetzungs-Richtlinie in den Vornormen DIN V 18026 für Oberflächenschutzsysteme und DIN V 18028 für die Rissfüllstoffe geschlagen. Diese Normen werden in naher Zukunft bereits bauaufsichtlich eingeführt und können somit angewendet werden. Die erforderlichen Regelungen für die EN 1504-3 „Statisch und nicht statisch relevante Instandsetzung“ werden in DIN V 18027 festgeschrieben, aber derzeit noch intensiv in den zuständigen Gremien diskutiert.

### Überarbeitung DVGW-Arbeitsblatt W 312

Im Arbeitsblatt W 312 der Deutschen Vereinigung des Gas- und Wasserfachs e.V. (DVGW) wird die Instandhaltung und Instandsetzung von Wasserbehältern in der Trinkwasserversorgung geregelt (Bild V-60). Nachdem in Zusammenarbeit mit dem Forschungsinstitut erstmalig prüfbar technische Anforderungen an Beschich-

tungssysteme für Trinkwasserbehälter im DVGW-Arbeitsblatt W 300 (veröffentlicht Mai 2005) implementiert wurden, erfolgt nun die Anpassung des Arbeitsblatts W 312.

Im Rahmen dieser Überarbeitung ist beabsichtigt, die relevanten europäischen und nationalen Regelwerke für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken zu übernehmen und damit für Auftraggeber, Produkthersteller und Bauausführende klare Regelungen auch für die Instandsetzung von Trinkwasserbehältern zu schaffen. Das bedeutet, dass der Hersteller zukünftig – ähnlich wie bereits jetzt für die Produkte, die gemäß der Instandsetzungs-Richtlinie des DAfStb zur Anwendung kommen – geeignete Identitätsprüfungen für die jeweiligen Stoffe durchzuführen hat. Bei neuen Produkten, neuen Formulierungen oder signifikanten Änderungen der Zusammensetzung oder der Rohstoffe sind die festgelegten Ausgangsprüfungen (Grundprüfungen) durchzuführen. Der Hersteller erklärt danach die Konformität auf Grundlage der Erstprüfung des Bauprodukts und der werkseigenen Produktionskontrolle (WPK).

### Überarbeitung ATV-M 168 und Normung im Bereich Betonrohre

Mit dem Merkblatt ATV-M 168 „Korrosion von Abwasseranlagen – Abwasserableitung“ wurde 1998 von der Abwassertechnischen Vereinigung erstmalig ein technisches Regelwerk zur Korrosionsthematik in Abwasserableitungsanlagen vorgelegt. In der aktuellen Überarbeitung des Merkblatts durch die aus der ATV-DVWK hervorgegangene Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef, erfolgt die Anpassung an technische und normative Neuerungen, z. B. an die neuen Betonnormen DIN EN 206-1 und DIN 1045-2. Während die Anforderungen für Beton in Kontakt mit Boden oder Grundwasser nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 in den Expositionsklassen XA geregelt ist, sind im vorliegenden Merkblatt Grenzwerte für eine dauernde, eine zeitweilige oder eine kurzzeitige Beanspruchung von Beton durch kommunales Abwasser festgelegt (Expositionsklasse „Rohr Innen“).

Darüber hinaus finden sich Regelungen hinsichtlich der Anforderungen an Rohrbetone (**Bild V-61**) im europäischen Regelwerk EN 1916 (Wasserzementwert  $\leq 0,45$ ) sowie in den nationalen Ergänzungen DIN V 1201 (Festigkeitsklasse Typ 1 C35/45 und Typ 2 C40/50; Mindestzementgehalt für Typ 1 entsprechend XA1 und Typ 2 entsprechend XA2 nach DIN EN



**Bild V-60:** Trinkwasserbehälter nach Instandsetzung



**Bild V-61:** Verlegung von Betonrohren für den Abwasserbereich

206-1/DIN 1045-2). Die Zuordnung der Rohrbetone für den Anwendungsfall „Rohr Innen“ zu den Expositionsklassen XA1 und XA2, die nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 nur für Boden und Grundwasser gelten, stellt keine befriedigende Lösung dar, da sie sowohl national als auch europäisch zu kontroversen Diskussionen führt.

Europäisch werden derzeit zwei Wege für die Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Betonrohren diskutiert:

- definierte Anforderungen an den Beton (maximaler Wasserzementwert, Festigkeitsklasse, Mindestzementgehalt etc.); hier konnte bei der Erarbeitung der EN 1916 bezüglich der Anforderungen an

den Beton, mit Ausnahme des Wasserzementwerts, keine europäisch einheitliche Lösung gefunden werden

- Performance-Prüfungen des Rohrbetons, für die derzeit jedoch weder definierte Prüfverfahren noch entsprechende Grenzwerte vorliegen

Vor diesem Hintergrund ist es die Aufgabe der TG2 der CEN TC 165 WG 9, eine „Machbarkeitsstudie“ zu erarbeiten, die eine europäische Lösung zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Betonrohren widerspiegelt. Für den Fall, dass sich wie bisher eine Einigung auf definierte Anforderungen an den Beton nicht erzielen lässt, werden möglicherweise Performance-Prüfungen in den Vordergrund rücken.



**Bild V-62:**  
Bauzustands-  
analyse eines  
Trinkwasser-  
behälters

## Beratung und Gutachten ■

In den letzten Jahren hat die Nachfrage nach betontechnologischer Beratung und gutachterlicher Tätigkeit durch das Forschungsinstitut der Zementindustrie deutlich zugenommen. Als Schwerpunkte sind zu nennen:

- Entwicklung optimierter Beton- und Mörtelmischungen für den jeweiligen Anwendungsbereich des Kunden,
- Durchführung von Bauwerksanalysen (z. B. von Trinkwasserbehältern, **Bild V-62**) und Bewertung,
- Erstellung von Instandsetzungskonzepten,
- Fragestellungen zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion und der Bewertung von Gesteinskörnungen (vgl. Abschnitt Alkali-Kieselsäure-Reaktion),
- chemischer Angriff an Beton.

Die effiziente Lösung der zum Teil komplexen Problemstellungen wird sichergestellt durch Spezialisten in allen betontechnischen Bereichen, die in den entsprechenden nationalen und internationalen Gremien vertreten sind und über umfassende Erfahrungen aus Labor und Praxis verfügen. Von besonderem Vorteil in diesem Zusammenhang ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit mit den Experten aus den Fachbereichen der Mineralogie, Chemie, Physik und Verfahrenstechnik der anderen Abteilungen des Forschungsinstituts.

Im Folgenden werden zwei Projekte aus dem Bereich der Entwicklung optimierter Beton- und Mörtelmischungen vorgestellt, bei denen die betontechnologische Unter-

stützung des Forschungsinstituts hinzugezogen wurde. Insbesondere aufgrund der weit reichenden Erfahrungen aus den Forschungsarbeiten und den Entwicklungen zum selbstverdichtenden Beton konnten für die speziellen Problemstellungen effiziente Lösungsvorschläge erarbeitet werden. Bei den Projekten handelt es sich um die Erstellung eines Hochdruckwasserdamms unter Tage und um die Verfüllung eines Hochtemperaturversuchsreaktors mit Porenleichtbeton.

### Projekt „Hochdruckwasserdamm“

Im Zuge der geplanten zentralen Wasserhaltung für die stillgelegten Betriebsfelder Emscherlippe, Haard und Blumenthal wurde der Verbindungsquerschlag zu den Grubenfeldern Haltern und Auguste-Victoria auf der dritten Sohle durch einen Hochdruckwasserdamm abgeschottet. Der Hochdruckwasserdamm hat die wasserdichte Abdämmung bei Aufnahme eines maximal möglichen hydrostatischen Wasserdrucks von 55 bar sicherzustellen. Die besondere Herausforderung war hierbei die erstmalige Förderung von Konstruktionsbeton über eine 2,6 km lange Rohrleitung DN 80 zum Einbauort unter Tage. Der Beton musste daher hydraulisch förderbar sein und ein kontinuierliches Einbringen mit einer Förderleistung von bis zu 30 m<sup>3</sup>/h ermöglichen. Als weitere besondere Anforderungen musste er sedimentationsstabil, schwindarm, selbstverdichtend und wasserundurchlässig sein. Der Eignungsnachweis dieses Spezialbetons wurde durch das Forschungsinstitut erbracht, die Bauausführung erfolgte durch die Fa. Wiemer & Trachte, Dortmund, und der Spezialbeton wurde durch die Fa. Elskes, Duisburg, geliefert.

### Projekt „Reaktorverfüllung“

Die Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor AVR GmbH, Jülich, hat von 1967 bis zur planmäßigen Außerbetriebnahme 1988 einen heliumgasgekühlten und grafitmoderierten Hochtemperaturreaktor (HTR) mit einer Leistung von 15 MW betrieben. Entsprechend den erteilten atomrechtlichen Genehmigungen wurden seit 1994 Arbeiten zur Stilllegung, zur Entladung des Reaktorkerns, zum Abbau von Anlagenteilen sowie zur Errichtung einer Materialschleuse durchgeführt. Für den vollständigen Rückbau der Anlage plant die AVR u. a., den Reaktorbehälter mit einem Porenleichtbeton mit einer Dichte von rund 0,7 kg/dm<sup>3</sup> zu befüllen, um die Einbauten im Reaktorbehälter für die Demontage zu fixieren. Der mit Porenleichtbeton gefüllte Reaktorbehälter soll unzerlegt aus dem Reaktorgebäude entfernt werden, um ihn mit einem Luftkissen-Transportsystem in ein Zwischenlager auf dem Gelände des Forschungszentrums Jülich zu transportieren. Dort soll der Reaktorbehälter bis zur endlagergerechten Konditionierung sicher zwischengelagert werden. Die betontechnische Entwicklung des Porenleichtbetons erfolgte in Zusammenarbeit mit der Fa. Schlumberger Oilfield Services, Vechna. Neben der geringen Rohdichte musste der Porenleichtbeton eine ausreichend hohe Druckfestigkeit und Kompressibilität aufweisen. Für eine sichere Verfüllung musste eine ausreichende Pumpbarkeit, eine gute Fließfähigkeit und eine hohe Mischungsstabilität sichergestellt werden.

Neben der betontechnischen Beratung und der Erstellung von gutachtlichen Stellungnahmen können durch das Forschungsinstitut auch nahezu alle betontechnologischen Untersuchungen und Prüfungen im Rahmen von Auftragsuntersuchungen durchgeführt werden. Die üblichen genormten Prüfungen sind nach EN ISO 17025 akkreditiert. Um auch für zukünftige Fragestellungen gut gerüstet zu sein, wird das Prüfequipment ständig erweitert. So wurde im Berichtszeitraum z. B. die Anlage zur Porositätsmessung mithilfe der Quecksilberintrusionsmessung durch eine weitere Hochdruckkomponente (Pascal 440) ergänzt, sodass durch eine höhere Druckbeanspruchung von bis zu 400 MPa der darstellbare Porenbereich hin zu feineren Poren (bis 1,8 nm) erweitert wurde. Die Kapazitäten zur Prüfung auf mögliche Alkali-Kieselsäure-Reaktionen wurden auf insgesamt vier Prüftruhen zur Durchführung des 60-°C-Betonversuchs (vgl. Abschnitt Alkali-Kieselsäure-Reaktion) erweitert.



# VI

## Umweltverträglichkeit von Zement und Beton

Zement ist das wichtigste Bindemittel für den Baustoffsektor, er wird weltweit in großen Mengen produziert. Dementsprechend kommt einer umweltverträglichen Zementherstellung und -verwendung eine große Bedeutung zu. Die deutsche Zementindustrie hat bereits seit vielen Jahren die Umweltverträglichkeit zementgebundener Baustoffe in allen Lebensphasen intensiv untersucht. Zunächst stand dabei die umweltverträgliche Zementherstellung im Vordergrund. Mit zunehmendem Einsatz von Sekundärstoffen bei der Zementherstellung richtete sich der Fokus verstärkt auf das Produkt Zement.

Wesentliche Voraussetzung für den Einsatz von Sekundärstoffen in der deutschen Zementindustrie ist, dass sie weder zu einer Umweltbelastung bei der Zementherstellung noch zu einer Beeinträchtigung der bautechnischen und umweltrelevanten Eigenschaften des Zements bzw. Betons führen. Umfangreiche Untersuchungen des Forschungsinstituts belegen, dass der Einfluss eines Zementwerks auf die Immissionssituation am Standort nur sehr gering ist. Auch führt der Sekundärstoffeinsatz zu keiner wesentlichen Änderung der Spurenelementgehalte im Zement, die in der gleichen Größenordnung liegen wie die Gehalte in natürlichen Gesteinen, Böden oder Tonen. Weiterhin haben alle bislang durchgeführten Auslauguntersuchungen gezeigt, dass aus zementgebundenen Baustoffen nur sehr geringe Spurenelementmengen freigesetzt werden, die keine negativen Auswirkungen auf die Umwelt haben.

Vor allen Dingen die europäische Bauproduktenrichtlinie legt Anforderungen fest, die von Baustoffen im Hinblick auf Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz zu erfüllen sind. Zement und Beton haben sich seit Jahrzehnten für Bauteile in Kontakt mit Boden, Grund- und Oberflächenwasser sowie Trinkwasser hervorragend bewährt. Daher sehen die geltenden technischen Regelwerke keine darüber hinaus gehenden Nachweise zur Hygiene oder Umweltverträglichkeit von Normzementen und daraus hergestellten Bauprodukten vor. Solche Nachweise sind in Deutschland zurzeit nur bei der bauaufsichtlichen Zulassung neuer, unbekannter Bauprodukte sowie für Werkstoffe in Kontakt mit Trinkwasser notwendig. Inwiefern die entsprechenden europäischen Regelungen, die derzeit ausgearbeitet werden, dies ändern, ist offen. Das Forschungsinstitut ist in den maßgeblichen Gremien vertreten und setzt sich dafür ein, dass genormte Zemente weiterhin ohne Prüfung zur Herstellung von Bauprodukten und Bauteilen in Kontakt mit Boden, Oberflächen- und Grundwasser eingesetzt werden können. Hierbei kann sich das Institut auf umfangreiche und langjährige Erfahrungen mit Zement und Beton sowie auf zahlreiche Forschungsergebnisse stützen.

Die Auswirkung des Bauens auf die regionale und globale Umwelt und damit auf die natürlichen Lebensgrundlagen rückt immer stärker in das öffentliche Bewusstsein. So beeinflussen heute ökologische Gesichtspunkte zunehmend die Auswahl der einzusetzenden Baustoffe und Bauweisen. Das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung wird im Bauwesen berücksichtigt, wenn auf die Bedürfnisse der Nutzer abgestimmte Bauwerke mit geringen Kosten und Belastungen für die Umwelt erstellt und dauerhaft genutzt werden. Dazu bereitet der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton mittelfristig ein Grundsatzpapier vor, das den am Betonbau Beteiligten Bewertungsregeln und technische Empfehlungen zum nachhaltigen Bauen mit Beton an die Hand gibt. Dieses Papier, an dem das Forschungsinstitut intensiv mitarbeitet, soll auch dazu dienen, die in Deutschland etablierten Vorgehensweisen in die künftigen europäischen Normen und Richtlinien einzubringen.



## Umweltkriterien für zementgebundene Baustoffe ■

Der Klinkerbrennprozess ist ein Stoffumwandlungsprozess, der sich durch das stark basisch reagierende Brenngut, die hohen Brennguttemperaturen von etwa 1450 °C sowie den intensiven Kontakt zwischen den Feststoffen und dem Ofengas mit Gas-temperaturen bis 2000 °C auszeichnet. Drehrohrofenanlagen der Zementindustrie bieten damit ausgezeichnete Bedingungen für die zuverlässige und umweltverträgliche Verwertung vieler Reststoffe. Grundsätzlich kommen in der deutschen Zementindustrie jedoch nur solche Reststoffe zum Einsatz, die die Emissionen, die Gleichmäßigkeit und die bautechnischen Eigenschaften des Zements sowie seine Umweltverträglichkeit nicht beeinträchtigen. Umfangreiche Untersuchungen des Forschungsinstituts 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 oder Tonen. Dies gilt unabhängig davon, ob bei der Zementherstellung Sekundärstoffe eingesetzt werden oder nicht.

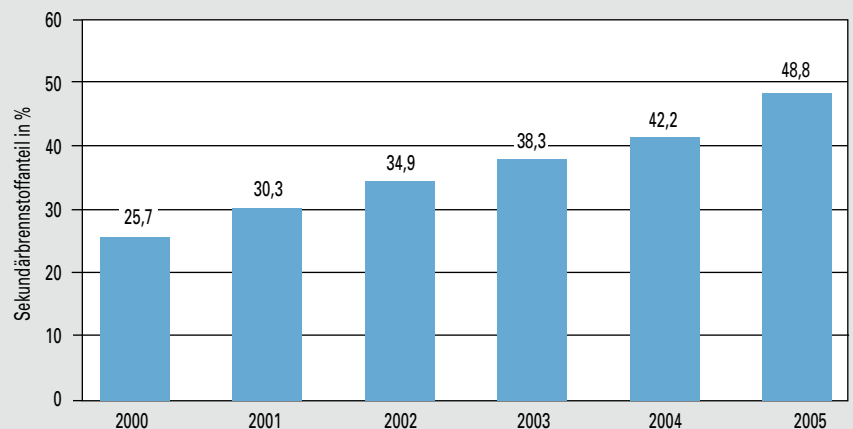
### Sekundärstoffeinsatz

Der Klinkerbrennprozess ist aufgrund seiner prozessspezifischen Gegebenheiten sehr gut für die energetische und stoffliche Verwertung zahlreicher Sekundärstoffe geeignet. Je nach der Rohstoffsituation eines Zementwerks können sekundäre Nebenprodukte als Rohmaterialkomponenten bzw. als Korrekturstoffe für die Rohmischung genutzt werden. Zum Einsatz kommen dabei Industriekalke, Gießereialsande, Kiesabbrand, Flugaschen sowie Reststoffe aus der Eisen- und Stahlindustrie usw. In **Tafel VI-1** sind die im Jahr 2005 eingesetzten Sekundärrohstoffe zusammengefasst.

Primärbrennstoffe können umweltverträglich durch Sekundärbrennstoffe ersetzt werden. So wurden im Jahr 2005 rund 50 % des Brennstoffenergieverbrauchs der deutschen Zementindustrie durch Sekundärbrennstoffe gedeckt. Die größte Bedeutung haben dabei aufbereitete Fraktionen aus Industrie- und Gewerbeabfällen, Altreifen, Altöl, Tiermehle und -fette sowie Altholz. In den vergangenen fünf Jahren zwischen 2000 und 2005 hat sich der Sekundärbrennstoffeinsatz in der deutschen Zementindustrie von 25,7 % auf 48,8 % erhöht (**Bild**

**Tafel VI-1: Einsatz sekundärer Rohstoffe bei der Klinkerherstellung (Jahr 2005)**

Gruppe	Sekundärrohstoff	Einsatz in 1000 t/a
Ca	Kalkschlämme aus der Trinkwasser- und Abwasseraufbereitung	96
	Kalkhydrat	
	Porenbetongranulat	
	Calciumfluorid	
Si	Gießereialsand	117
Si-Al	Rückstände aus der Kohleaufbereitung	4
Fe	Kiesabbrand	111
	Erz verunreinigt	
	Eisenoxid/Flugasche-Gemisch	
	Stahlwerksstäube Walzzunder	
Si-Al-Ca	Hüttensand	104
	Flugasche	333
	Papierreststoffe	173
	Aschen aus Verbrennungsprozessen	
S	Mineralische Reststoffe, z. B. ölverunreinigte Böden	20
	Gips aus der Rauchgasentschwefelung und sonstige Gipse	
Al	Aufbereitungsrückstände von Salzschlacken, Aluminiumhydroxid	70



**Bild VI-1: Entwicklung des Sekundärbrennstoffeinsatzes in der deutschen Zementindustrie**

**VI-1).** Die energetische Verwertung leistet einen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Minderung, ohne dass dabei produktionsspezifische Reststoffe anfallen. Die hohen Temperaturen der Drehofenfeuerung gewährleisten, dass organische Substanzen praktisch vollständig zu Kohlendioxid und Wasser umgesetzt werden. Die Emissionskonzentrationen organischer Verbindungen wie Dioxine, Furane usw. sind deshalb sehr gering. Auch dieses gilt unabhängig von den eingesetzten Brennstoffen.

### Spurenelemente im Zement

Zement enthält wie alle aus natürlichen Rohstoffen stammenden Baustoffe geringe Mengen Spurenelemente. Für den Spurenelementgehalt im Zementklinker sind im

Wesentlichen die Spurenelementgehalte in den zur Klinkerherstellung verwendeten Rohmaterialien maßgebend. Diese Gehalte können sich je nach dem Rohstoffvorkommen deutlich unterscheiden. Das Verhalten der Spurenelemente beim Klinkerbrennprozess wird durch ihre physikalischen/chemischen Eigenschaften, insbesondere ihre Flüchtigkeit, bestimmt. Die mit den Brenn- und Rohstoffen zugeführten Spurenelemente können entsprechend ihres Dampfdrucks ganz oder teilweise in den heißen Zonen des Vorwärmers und/oder des Ofens verdampfen und mit den weiteren in der Gasphase vorliegenden Bestandteilen reagieren. In den kälteren Bereichen des Ofensystems können sie auf dem Brenngut kondensieren.



Nichtflüchtige Elemente, wie zum Beispiel Arsen, Beryllium, Chrom, Kupfer, Nickel, Vanadium und Zink, sowie schwerflüchtige Elemente, wie zum Beispiel Blei und Cadmium, werden praktisch vollständig mit dem Klinker aus dem Ofensystem ausgetragen. Das leichtflüchtige Element Thallium wird im Vorwärmer zurückgehalten, sodass sich ein so genannter innerer Kreislauf aufbaut. Das hochflüchtige Element Quecksilber kann in den Abgasreinigungseinrichtungen bei Temperaturen unterhalb von etwa 120 °C auf Staubpartikeln kondensieren und mit diesen abgetrennt werden.

Die Einbindung der Spurenelemente in die Klinkerphasen kann je nach den chemischen Eigenschaften der Elemente und den Prozessbedingungen auf unterschiedliche Arten erfolgen. Zum Beispiel ersetzt Barium in fast allen Klinkerphasen das Calcium. Chrom wird im Wesentlichen im  $C_2S$  eingebaut. Mangan wird im  $C_4AF$  eingebaut und kann Silizium und Calcium im  $C_3S$  ersetzen. Zink wird in  $C_3S$  und  $C_2S$  eingebaut und verbessert die Klinkerphasenbildung. Andere Elemente, wie zum Beispiel Arsen und Antimon, bilden schwerflüchtige Verbindungen wie Calciumarsenat bzw. Calciumantimonat. Diese Einbindung der Spurenelemente in die Klinkerphasen bewirkt, dass diese Spurenelemente beim Kontakt des Wassers nicht spontan in Lösung gehen, sondern erst im Verlauf der Hydratation „aufgeschlossen“ werden.

Werden natürliche Einsatzstoffe durch geeignete sekundäre Brenn- und/oder Rohstoffe ersetzt, so ist deren Spurenelementgehalt ein wichtiges Beurteilungskriterium. Bei dem heute üblichen Einsatz von Sekundärstoffen in der deutschen Zementindustrie können sowohl geringfügige Erhöhungen als auch Verminderungen der Spurenelementgehalte in den Zementen auftreten. Diese Veränderungen werden jedoch üblicherweise durch die natürlichen Konzentrationsschwankungen in den primären Einsatzstoffen überdeckt.

### Spurenelementfreisetzung

Zur Mörtel- und Betonherstellung werden Zement, Gesteinskörnungen sowie gegebenenfalls Betonzusatzstoffe und Betonzusatzmittel mit dem Zugabewasser gemischt. Wie der Zement enthalten auch Gesteinskörnungen und Betonzusatzstoffe geringe Mengen an Spurenelementen. Der Spurenelementanteil, der mit dem Zugabewasser oder Betonzusatzmitteln in den Baustoff eingebracht wird, kann erfahrungsgemäß

vernachlässigt werden. Für die Beurteilung der Umweltverträglichkeit eines Baustoffs ist jedoch nicht der Gehalt möglicherweise bedenklicher Substanzen entscheidend, sondern nur der Anteil, der während der Herstellung, Nutzung und gegebenenfalls beim Abbruch oder der Wiederverwendung auf die Umweltmedien Wasser, Boden oder Luft übergehen kann.

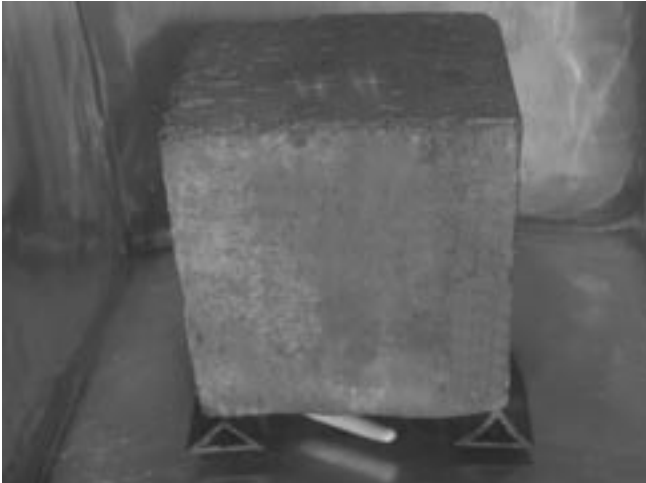
Zement durchläuft unmittelbar nach dem ersten Kontakt mit dem Zugabewasser eine Serie komplexer chemischer Reaktionen, bei denen zum Beispiel Calciumsulfat und ein geringer Teil des Tricalciumaluminats in Lösung gehen. Hierbei entstehen Calciumhydroxid und Trisulfat (Ettringit) als erste Reaktionsprodukte, und nach wenigen Minuten wird eine Hydroxylionenkonzentration zwischen 50 und 80 mmol/l erreicht. Dieses entspricht einem pH-Wert von 12,7 bis 12,9. Aufgrund dieser hohen Alkalität werden zahlreiche Metallionen, wie zum Beispiel Cadmium, Quecksilber, Mangan, Cobalt und Nickel, die eventuell beim Kontakt des Zements mit dem Zugabewasser in Lösung gehen, unmittelbar wieder als unlösliche Hydroxide ausgefällt. Spurenelemente, wie zum Beispiel Arsen oder Molybdän, die Oxo-Anionen bilden, fallen als unlösliche Calciumverbindungen aus. Andere Spurenelemente werden im weiteren Hydratationsverlauf an den gebildeten Zementphasen sorbiert oder in deren Kristallgitter eingebaut.

Aufgrund dieser chemischen Einbindung bestimmt der Anteil eines Spurenelements, der im Porenwasser des Zementsteins gelöst vorliegt, den Grad der Freisetzung. Neben den chemischen Wechselwirkungen der Spurenelemente mit den Hydratationsprodukten kommt hinzu, dass sich bei der Erhärtung zementgebundener Baustoffe ein festes, weitgehend wasserdichtes Gefüge ausbildet. Eine Auslaugung im Porenwasser gelöster Substanzen aus Festbetonen kann deshalb nur durch Diffusionsprozesse in flüssigkeitsgefüllten Poren des Mörtels oder Betons erfolgen. Treibende Kraft für die Diffusion ist der Konzentrationsunterschied der jeweiligen Substanz in der Porenlösung und dem auslaugenden Umgebungswasser. Dabei wird die Transportgeschwindigkeit im Wesentlichen durch das Diffusionsverhalten der jeweiligen Substanz und die Porenverteilung des zementgebundenen Baustoffs, insbesondere den Anteil miteinander verbundener Kapillarporen, bestimmt. Für sachgerecht hergestellte Betone kann die Diffusionsgeschwindigkeit einer Substanz um einen Faktor bis zu 5000 gegenüber der freien Diffusion in Wasser gemindert werden.

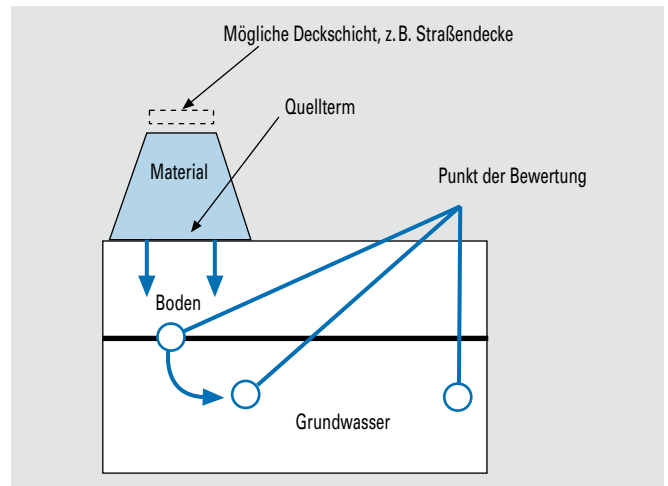
Die hervorragenden Bindungseigenschaften von Zementen für Spurenelemente waren Gegenstand zahlreicher Forschungsaktivitäten. Dabei haben alle bislang durchgeführten Auslauguntersuchungen gezeigt, dass aus zementgebundenen Baustoffen nur sehr geringe Mengen an Spurenelementen freigesetzt werden. Insgesamt kann festgestellt werden, dass zementgebundene Baustoffe unter üblichen Anwendungsbedingungen keine negativen Auswirkungen auf die Umwelt haben.

Um das Wissen zur Einbindung und Freisetzung von Spurenelementen in/aus zementgebundenen Baustoffen zu vertiefen, wurde bereits vor mehreren Jahren von einem europäischen Konsortium das Forschungsvorhaben „Environmental Criteria for Cement Based Products (ECRICEM)“ begonnen. Forschungspartner sind das Energy Research Centre for the Netherlands, die Holcim Group Support Ltd, Ciments d’Obourg, Norcem A.S. und der Verein Deutscher Zementwerke. In den Forschungsarbeiten wurde zunächst schwerpunktmäßig untersucht, in welchem Maß Spurenelemente aus zementgebundenen Baustoffen freigesetzt werden können. Hierzu wurden Portlandzemente und Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen weltweiter Produktionsstandorte verwendet. Ausgewählt wurden solche Zemente, die naturgemäß hohe Spurenelementgehalte hatten. Die Ergebnisse der Untersuchungen haben das günstige Umweltverhalten zementgebundener Baustoffe bestätigt. Sie haben auch gezeigt, dass alle Zemente generell eine gleichartige Freisetzungsscharakteristik aufweisen.

Nach Abschluss der experimentellen Arbeiten im Jahr 2004 wurde intensiv an der Modellierung chemischer Reaktionen in zementgebundenen Baustoffen gearbeitet. Das Verständnis der „kontrollierenden“ Faktoren, die die Löslichkeit eines Spurenelements im Porenwasser und damit auch die diffusionskontrollierte Freisetzung bestimmen, ist für die Bewertung des Langzeitauslaugverhaltens zementgebundener Baustoffe unerlässlich. So kann ein bestimmtes Spurenelement nicht für sich alleine betrachtet werden, sondern nur in Wechselwirkung mit den anderen Komponenten im Porenwasser und mit den Zementhydratphasen. Eine Berücksichtigung dieser Wechselwirkungen, zum Beispiel die Bildung schwerlöslicher Verbindungen wie Bleichromat, die die Freisetzung der entsprechenden Elemente entscheidend beeinflussen können, ist nur durch Modellrechnungen möglich.



**Bild VI-2:** Auslaugung eines Betonwürfels (Abmessungen 10 x 10 x 10 cm<sup>3</sup>) in einem Langzeitstandtest



**Bild VI-3:** Freisetzungsszenarium für körniges Material in Kontakt mit Boden (Beispiel: Straßenbau)

Auch Effekte, wie z.B. die Carbonatisierung oder die Ausbildung von Carbonatschutzschichten, die sich auf die Freisetzung von Spurenelementen aus Betonen in Kontakt mit Oberflächenwasser, Grundwasser und Boden auswirken, lassen sich durch Laborexperimente nur schwer simulieren. In diesem Fall können mechanistische Modellrechnungen angewendet werden, mit denen abgeschätzt werden kann, wie sich diese Effekte auf die Spurenelementauslaugung auswirken. Anhand experimenteller Ergebnisse, zum Beispiel von Auslaugversuchen in einem Langzeitstandtest (**Bild VI-2**), und entsprechenden Modellrechnungen lässt sich dann der so genannte „Quellterm“ für die Auslaugung ermitteln.

Weiterhin wurde im Berichtszeitraum an Rechenmodellen für die Ausbreitung von Substanzen im Boden und Grundwasser (Transportmodell) gearbeitet. Mit einer Kombination des Quelltermmodells und des Transportmodells können dabei für definierte Freisetzungsszenarien Laborergebnisse hinsichtlich der Umweltwirkung eines Bauwerks oder Bauteils auf die Bauwerksumgebung bewertet werden. So kann der Konzentrationsverlauf der Spurenelemente für beliebige Abstände zum Bauwerk berechnet werden – sowohl für die ungesättigte Bodenzone als auch das Grundwasser. **Bild VI-3** zeigt, wie aus körnigem Material, das zum Beispiel im Straßenbau verwendet wird, Spurenelemente in dem angrenzenden Boden freigesetzt werden. Zurzeit werden die folgenden sieben Freisetzungsszenarien intensiv bearbeitet:

- Körniges Material in Kontakt mit Boden
- Bauschutt in Kontakt mit Boden
- Monolithisches Material in Kontakt mit Boden
- Monolithisches Material in Kontakt mit Regen
- Monolithisches Material in Kontakt mit Trinkwasser
- Monolithisches Material in Kontakt mit Oberflächenwasser
- Dachflächen in Kontakt mit Regen

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse des ECRICEM-Projekts eine solide, wissenschaftlich abgesicherte Basis für die anstehenden europäischen Normungsarbeiten zur Verankerung der wesentlichen Anforderungen an Hygiene, Gesundheit und Umwelt in den harmonisierten europäischen Produktnormen bieten.

## REACH ■

### Europäische und deutsche Regelwerke

Das in der Öffentlichkeit stark gestiegene Umweltbewusstsein spiegelt sich auch in Regelwerken und Normen wider. So wird z. B. national festgelegt, welche umweltrelevanten Anforderungen von Baustoffen in Kontakt mit Boden und Grundwasser oder für die hygienische Eignung von Werkstoffen in Kontakt mit Trinkwasser eingehalten werden müssen. Darüber hinaus wird zurzeit intensiv an entsprechenden europäischen Regelungen gearbeitet. Dabei sind für zementgebundene Baustoffe ins-

besondere die Anforderungen der europäischen Bauproduktenrichtlinie zu beachten. Mit der zukünftigen REACH-Verordnung wird das europäische Chemikalienrecht neu gestaltet. Zemente und zementhaltige Zubereitungen sind davon ebenso betroffen wie andere anorganische Baustoffe und alle Chemikalien.

### REACH

Im Dezember 2006 haben das Europäische Parlament und der Europäische Rat die neue europäische Chemikalienverordnung zur **Registrierung, Evaluierung und Autorisierung von Chemikalien** „REACH“ verabschiedet. Damit hat eines der umfangreichsten europäischen Gesetzgebungsverfahren seinen vorläufigen Abschluss gefunden. Knapp sechs Jahre nachdem das erste EU-Weißbuch veröffentlicht wurde und gut drei Jahre nachdem die EU-Kommission den Verordnungsentwurf erarbeitet hatte und hierzu mehr als 4600 Änderungsanträge eingereicht wurden, steht mit der Verordnung vorerst das Grundgerüst des neuen EU-Chemikalienrechts. Über die tatsächliche Umsetzung und damit auch über die Praktikabilität und Kosteneffizienz der Regelungen entscheiden letztlich die verschiedenen technischen Leitfäden, die zurzeit von der EU-Kommission mithilfe zahlreicher Experten entwickelt werden. Allein die für die Unternehmen bestimmten zehn verschiedenen „Umsetzungshilfen“ umfassen gegenwärtig schon mehrere tausend Seiten. Damit REACH letztendlich funktioniert, benötigen vor allem kleine und mittlere Betriebe einfache Instrumente und Hilfestellungen. An diesen arbeiten wiederum nationale Institutionen und Verbände.

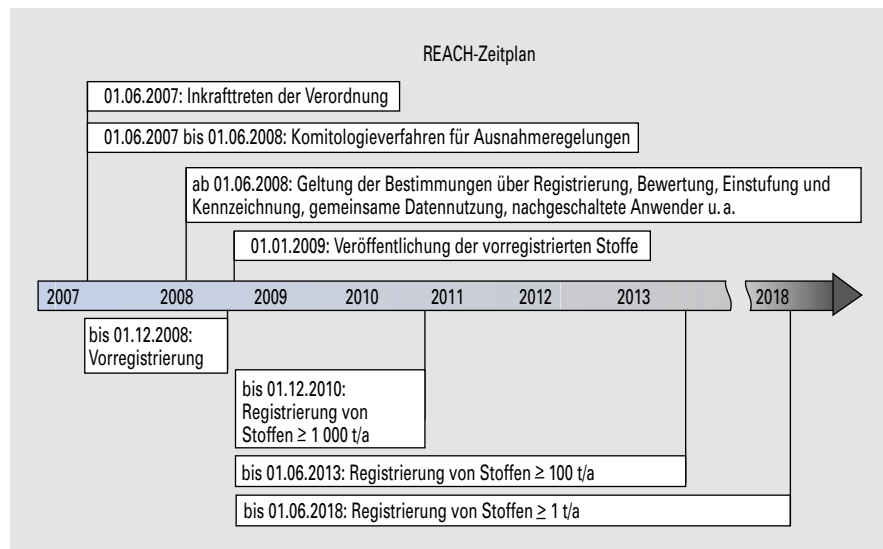
## Inhalte von REACH

Die wesentlichen Ziele der neuen Stoff- und Chemikalienpolitik sind eine nachhaltige Entwicklung, der Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umwelt sowie die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der chemischen Industrie. Insbesondere sollen durch REACH Behörden, Weiterverarbeiter und andere Kunden einen besseren Zugang zu sicherheitsrelevanten Informationen über die verwendeten Stoffe bekommen. Nach dem Motto „No Data, No Market“ dürfen künftig nur noch Stoffe in Verkehr gebracht werden, zu denen im Rahmen einer Registrierung ausreichende Informationen vorliegen. Gefordert wird dieses für alle Stoffe, die in einer Menge von größer 1 t jährlich in der EU produziert oder in die EU importiert werden. Dies gilt auch für die so genannten Altstoffe oder „Phase-In-Stoffe“, die schon vor September 1981 auf den Markt gekommen sind.

Hersteller und Importeure geben die Stoffinformationen an alle Abnehmer bzw. nachgeschalteten Anwender weiter. Etwa 30 000 im Handel erhältliche Stoffe sind danach registrierungspflichtig und bis zu 1 500 besonders besorgniserregende Stoffe zudem zulassungspflichtig. Für die Umsetzung von REACH wurde eigens die neue Europäische Agentur für chemische Stoffe in Helsinki geschaffen. **Bild VI-4** gibt die wichtigsten Eckdaten für die Umsetzung der REACH-Verordnung an.

## Auswirkungen auf die Zementindustrie

Grundsätzlich unterscheidet die REACH-Verordnung zwischen Stoffen und Zubereitungen. Sofern Stoffe nicht unter eine explizite Ausnahmeregelung fallen, müssen sie registriert werden. Zubereitungen hingegen sind als solche nicht registrierungspflichtig. Insofern fallen Zemente nicht unter die Registrierungspflicht, da es sich hierbei um Zubereitungen handelt. Portlandzementklinker ist hingegen ein Stoff. Gemäß Anhang V der REACH-Verordnung ist er jedoch explizit von der Registrierungspflicht ausgenommen. Der Grund hierfür liegt insbesondere darin, dass es sich bei Zementklinker um einen bekannten und bewährten Stoff handelt, der keine Chemikalie im ursprünglichen Sinn der Verordnung darstellt. Insofern besteht auch keine Notwendigkeit für eine Vorregistrierung. Da die Anhänge mit den Ausnahmen von der Registrierungspflicht jedoch nur einen vorläufigen Charakter haben und innerhalb von zwölf Monaten durch ein europäisches Expertengremien im „Komitologieverfahren“ überarbeitet



**Bild VI-4: Inkrafttreten und Umsetzungsfristen für die REACH-Verordnung**

werden, bleibt für die Übergangszeit von einigen Monaten eine gewisse Unsicherheit bestehen.

Auch Abfälle sind von der Registrierungspflicht ausgenommen. Für Sekundärstoffe ist eine Ausnahme nicht zustande gekommen. Rat und Parlament haben jedoch der EU-Kommission den Auftrag erteilt, den Geltungsbereich der Verordnung innerhalb von fünf Jahren auf Überschneidungen mit anderen Regelwerken hin zu überprüfen.

Unabhängig von der Frage der Registrierungspflicht werden durch die REACH-Verordnung auf jeden Fall die Anforderungen an Zement-Sicherheitsdatenblätter geändert. Dazu gehört, dass ein Zementhersteller – in der Rolle als nachgeschalteter Anwender – Informationen zu allen von ihm eingesetzten Stoffen bereithalten oder ggf. einholen muss. Diese benötigt er, wenn er die geforderten so genannten erweiterten Sicherheitsdatenblätter erstellt und hierin die entsprechenden Expositionsszenarien darlegt. Zu diesen Stoffen gehören z. B. Eisensulfat, Anhydrit, Gips, Mahlhilfsmittel, Steinkohlenflugasche oder Hüttensand.

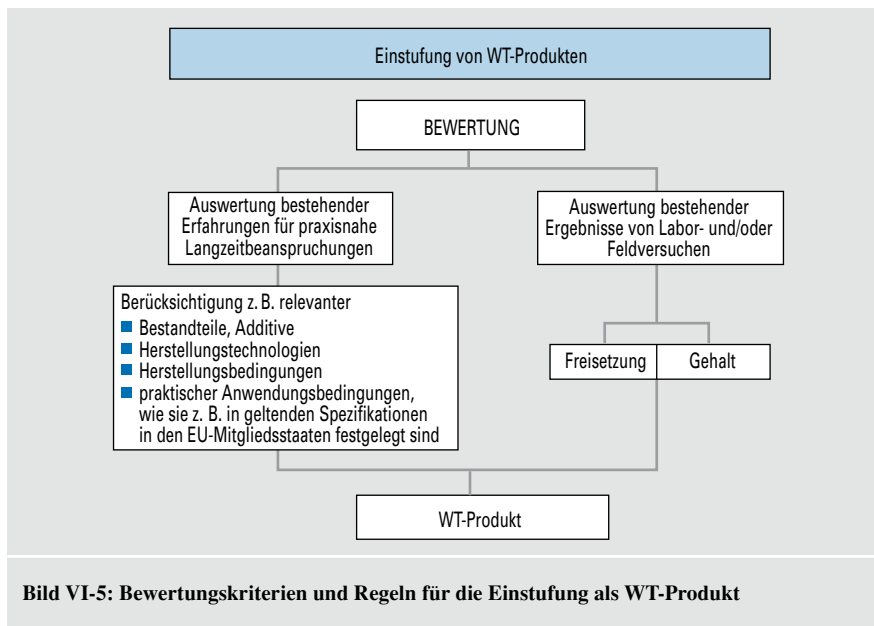
In der Regel ist ein Zementwerk nur der Hersteller von Zementklinker und ansonsten nachgeschalteter Anwender (Verwender) von anderen, in den „Zementzubereitungen“ eingesetzten Stoffen. In dieser Funktion hat er aber zu prüfen, ob seine Verwendung von den im Sicherheitsdatenblatt seines Lieferanten angegebenen

Expositionsszenarien abgedeckt ist. Sofern dies der Fall ist, übernimmt er diese Expositionsbeurteilung für sein eigenes Zement-Sicherheitsdatenblatt. Andernfalls ist der Lieferant darüber zu informieren.

## Europäische Bauproduktenrichtlinie ■

### Mandat M/366 und CEN/TC 351

Die europäische Bauproduktenrichtlinie fordert, dass nur solche Bauprodukte auf dem europäischen Binnenmarkt gehandelt werden dürfen, die für die vorgesehene Verwendung geeignet sind. Traditionell sind im Baurecht Anforderungen, z. B. an die Standsicherheit, den Brandschutz und die Nutzungssicherheit verankert. Darüber hinaus bezieht sich die europäische Bauproduktenrichtlinie gezielt auf den Schutz von Hygiene, Gesundheit und Umwelt (Wesentliche Anforderung Nr. 3). Zur Umsetzung dieser Anforderung hat die Europäische Kommission Anfang des Jahres 2005 das Mandat M/366 „Entwicklung horizontaler genormter Bewertungsmethoden für harmonisierte Konzepte zu gefährlichen Stoffen gemäß der Bauproduktenrichtlinie – Emissionen in Raumluft, Boden, Oberflächenwasser und Grundwasser“ herausgegeben. Das Mandat sieht vor, dass horizontale Prüf- und Bewertungsverfahren durch das Europäische Komitee für Normung (CEN) erarbeitet werden. Die konkreten Anforderungen an die Bauprodukte werden weiterhin national von den einzelnen Mitgliedsstaaten festgelegt.



Von Bedeutung ist, dass in dem Mandat ein mehrstufiges Nachweiskonzept verankert ist. Dieses Konzept soll sicherstellen, dass nur dort Prüfungen gefordert werden, wo dies für das jeweilige Bauprodukt tatsächlich notwendig ist. Im Einzelnen sind die folgenden Nachweiskonzepte 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 (Further Testing), so genannte „FT-Produkte“

Welches dieser Nachweiskonzepte für ein Bauprodukt vorzusehen ist, soll durch die Mitgliedsstaaten, vertreten durch den „Ständigen Ausschuss für das Bauwesen (SCC, Standing Committee on Construction)“ festgelegt werden. Zur Vorbereitung entsprechender Entscheidungen wurde von der EU-Kommission die Expertengruppe „Dangerous Substances“ eingerichtet, in der die Industrie über die „Vereinigung Europäischer Baustoffhersteller (CEPMC)“ vertreten ist.

#### Normungsarbeiten im CEN/TC 351

Zur Ausarbeitung der benötigten Prüf- und Bewertungsverfahren wurde im Jahr 2006 das Technische Komitee CEN/TC 351 „Bewertung der Freisetzung gefährlicher Stoffe aus Bauprodukten“ gegründet. Innerhalb dieses TCs wurden, entsprechend der unterschiedlichen Nutzungsbedingungen der Bauprodukte, die beiden folgenden Arbeitsgruppen eingerichtet:

■ Arbeitsgruppe 1: Freisetzung in Boden und Grund-/Oberflächenwasser

■ Arbeitsgruppe 2: Emissionen aus Bauprodukten in die Innenraumluft

Zur Vorbereitung der eigentlichen Normungsarbeiten werden zurzeit sechs Technische Berichte (CEN/TR) zu den Themen Handelsbarrieren, horizontale Prüfmethode und deren Anwendung, Nachweiskonzepte für WT/WFT/FT-Produkte, Probenahme, Bestimmung des Gehalts geregelter gefährlicher Stoffe sowie Radioaktivität erstellt. Während die Arbeiten zu den meisten Berichten erst am Anfang stehen, liegt für den CEN/TR über Nachweiskonzepte für WT/WFT/FT-Produkte bereits ein ausführlicher Entwurf vor, der unter maßgebender Mitarbeit des Forschungsinstituts entstand.

Gemäß dem Berichtsentwurf ist eine einmalige Einstufung als WT-Produkt für Bauprodukte vorgesehen, die einer europäischen technischen Spezifikation (ETS) entsprechen. Voraussetzung für eine Einstufung als WT-Produkt ist, dass bestehende Langzeiterfahrungen oder Prüfergebnisse vorliegen. Diese müssen zeigen, dass das Produkt keine signifikanten Mengen geregelter gefährlicher

Stoffe enthält oder diese nur in unbedeutenden Mengen freisetzt. Außerdem sollen vorliegende Kenntnisse über die Bestandteile, Rohmaterialien, den Produktionsprozess usw. der entsprechenden Produkte in die Beurteilung einbezogen werden. **Bild VI-5** fasst die vorgesehenen Bewertungskriterien und Regeln für eine Einstufung als WT-Produkt zusammen. Die Entscheidung über die Einstufung von Bauprodukten in die Nachweisklasse WT soll durch die EU-Kommission in Absprache mit den EU-Mitgliedsstaaten vorgenommen werden.

Der Nachweis ohne regelmäßige Prüfung (WFT-Produkte) ist im Rahmen einer Konformitätsbewertung für Produkte oder für Produktgruppen vorgesehen, die einer ETS entsprechen und für die der oder die Hersteller in einer Erstbewertung nachweisen, dass die in der Norm festgelegten Bedingungen erfüllt sind. In dieser Erstbewertung werden zunächst die Bestandteile, Rohmaterialien und das Freisetzungsverhalten der Produkte beurteilt. Ist eine relevante Freisetzung möglich, muss durch eine Erstprüfung mit harmonisierten europäischen Prüfmethode nachgewiesen werden, dass die freigesetzten Mengen geregelter gefährlicher Stoffe unterhalb der jeweiligen Grenzwerte der Mitgliedsstaaten der EU liegen.

Ist eine Einstufung als WT-Produkt bzw. eine Identifizierung als WFT-Produkt nicht möglich, müssen diese Bauprodukte entsprechend der in ihren technischen Spezifikationen festgelegten Bewertungskriterien und Regeln für FT-Produkte regelmäßig geprüft werden (Routineprüfungen). Dabei muss nachgewiesen werden, dass die Vorschriften zur Freisetzung geregelter gefährlicher Stoffe des jeweiligen EU-Mitgliedsstaates, in dem das Produkt auf den Markt gebracht werden soll, erfüllt werden. Falls die Ergebnisse der regelmäßigen Prüfungen zeigen, dass das spezifische Produkt die Bewertungskriterien für ein WFT-Produkt erfüllt, kann der Hersteller eine Neueinstufung als WFT-Produkt vornehmen. **Bild VI-6** gibt einen Überblick über den derzeitigen Diskussionsstand im CEN/TC 351 zur Einstufung von WT-Produkten und der Konformitätsbewertung von WFT/FT-Produkten. Dabei gilt diese generelle Vorgehensweise sowohl für die Freisetzung geregelter gefährlicher Stoffe in Boden, Oberflächen- und Grundwasser als auch für die Emissionen geregelter gefährlicher Stoffe aus Bauprodukten in die Innenraumluft.

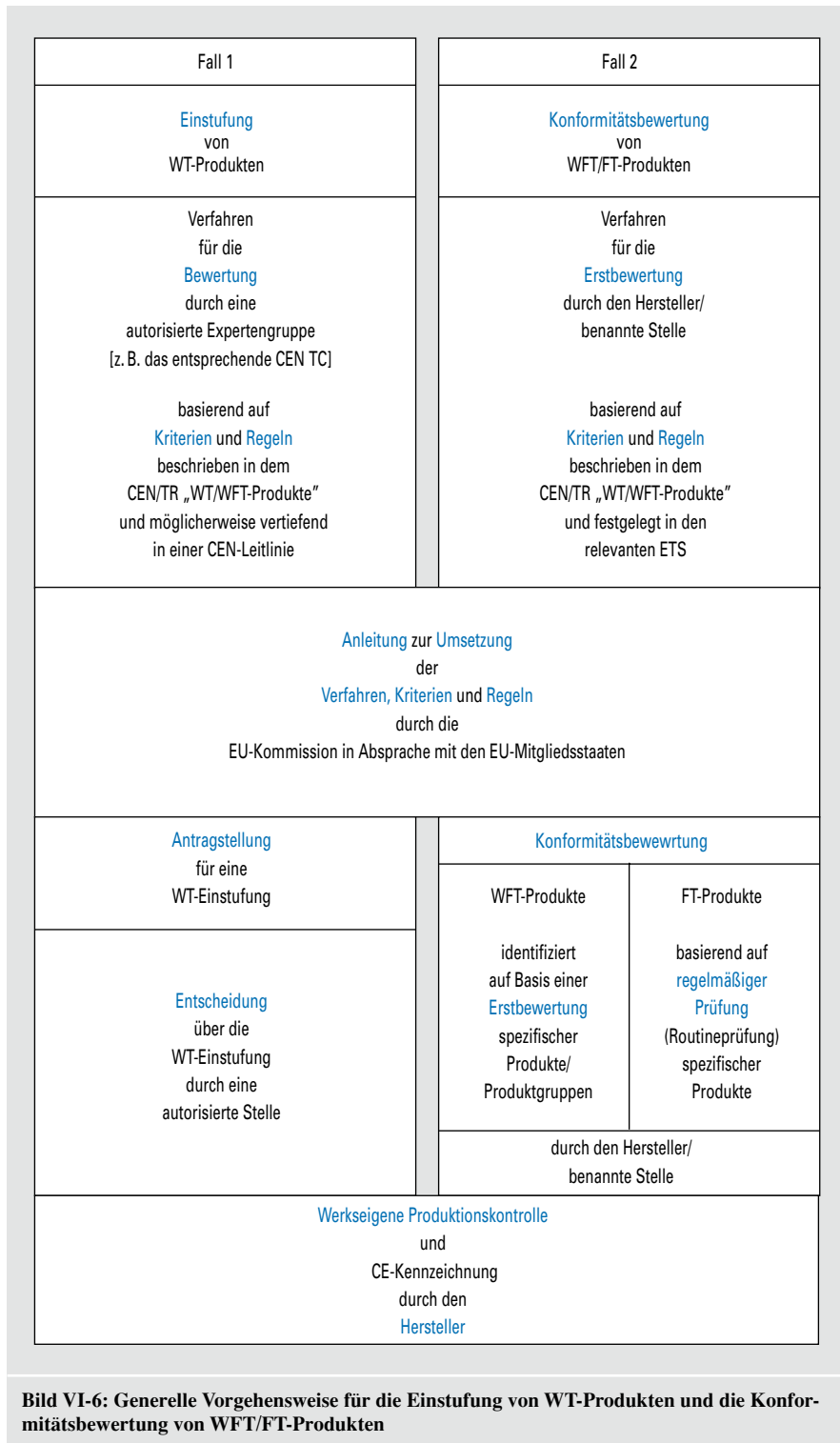
**Auswirkungen auf Zement und zementgebundene Bauprodukte**

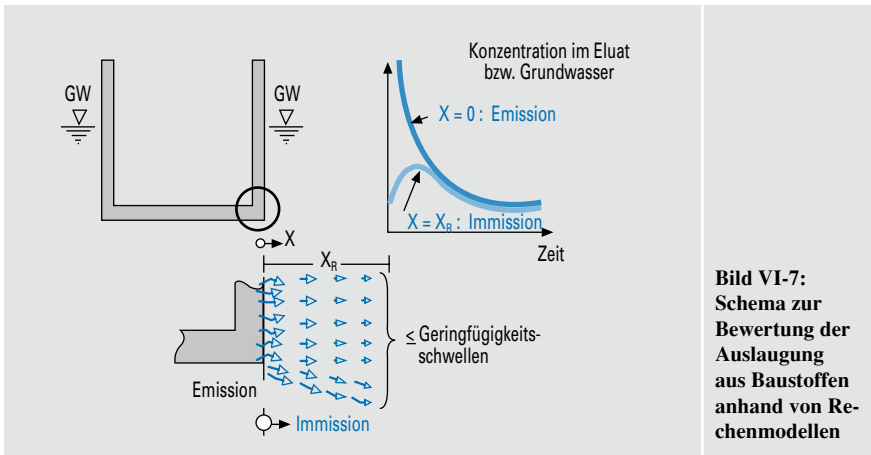
Die Normungsarbeiten im CEN/TC 351 stehen derzeit noch am Anfang. Bis konkrete Festlegungen getroffen und verabschiedet worden sind, werden noch einige Jahre vergehen. Das Forschungsinstitut ist in den maßgeblichen Gremien vertreten und bringt die günstigen Erfahrungen, die seit Jahrzehnten für zementgebundene Bauteile in Kontakt mit Boden, Oberflächen- und Grundwasserwasser sowie Trinkwasser gewonnen wurden, in die anstehenden Normungsarbeiten ein.

Alle bislang durchgeführten Auslauguntersuchungen haben gezeigt, dass aus zementgebundenen Baustoffen nur sehr geringe Spurenelementmengen ausgelaugt werden, die unter üblichen Anwendungsbedingungen keine negativen Auswirkungen auf die Umwelt haben. Die vorliegenden wissenschaftlich abgesicherten Untersuchungsergebnisse bilden aus Sicht der Zementindustrie die Basis dafür, dass genormte Zemente weiterhin ohne Prüfung zur Herstellung von Bauprodukten oder Bauteilen in Kontakt mit Boden, Oberflächen- und Grundwasser eingesetzt werden können (WT-Produkte). Eine Arbeitsgruppe im CEMBUREAU bereitet einen entsprechenden Bericht vor, der sich auf Daten abstützt, die europaweit erhoben wurden.

**DIBT-Merkblatt „Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ ■**

In Deutschland ist durch die Bauaufsicht festgelegt, dass Bauprodukte alle Anforderungen des Umweltschutzes erfüllen, wenn sie entweder der entsprechenden Produktnorm genügen oder über eine bauaufsichtliche Zulassung verfügen. Für neue, unbekannte Bauprodukte, die einer bauaufsichtlichen Zulassung bedürfen, müssen hingegen bei den entsprechenden Zulassungsprüfungen auch mögliche Boden- und Grundwassergefährdungen berücksichtigt werden. Um hierzu eine einheitliche Vorgehensweise zu gewährleisten, wurde vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) – unter Beteiligung der betroffenen Industrien – das Merkblatt „Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ ausgearbeitet und in der Fassung November 2000 veröffentlicht.





**Tafel VI-2: Gegenüberstellung der Werte des DIBt-Merkblatts (Ausgabe: November 2000) und der neuen Geringfügigkeitsschwellen der LAWA für anorganische Parameter zur Beurteilung lokal begrenzter Grundwasserverunreinigungen**

Anorganische Parameter	Einheit	Geringfügigkeitsschwellen	
		DIBt-Merkblatt	LAWA-Werte
Antimon (Sb)	µg/l	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 <sup>1)</sup>
Zink (Zn)		500	58
Zinn (Sn)		40	-
Chlorid (Cl <sup>-</sup> )		-	250000
Cyanid, gesamt (CN <sup>-</sup> )		50	50
Cyanid, leicht freisetzbar (CN <sup>-</sup> )	10	5	
Fluorid (F <sup>-</sup> )	750	750	
Sulfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	-	240000	

<sup>1)</sup> Die Anwendung der Geringfügigkeitsschwelle für Vanadium ist bis zum 31.12.2007 ausgesetzt.

Um die stoffspezifischen Eigenschaften der verschiedenen Bauprodukte sachgerecht zu berücksichtigen, werden die allgemeinen Bewertungsgrundsätze in einem Teil II für unterschiedliche Bauprodukte konkretisiert. Für Beton und Betonausgangsstoffe wurde von der entsprechenden DIBt-Projektgruppe ein Bewertungsmodell entwickelt, mit dem die Ergebnisse von Laboruntersuchungen auf reale Grundwasserbelastungen in der unmittelbaren Umgebung eines Bauwerks übertragen werden können. Das Bewertungsmodell beruht auf der Kom-

bination eines Diffusionsmodells für die Auslaugung aus dem Baustoff und eines geologischen Strömungs- und Transportmodells für die Stoffausbreitung im Boden bzw. Grundwasser. Durch diese Kombination kann der zeitliche und örtliche Verlauf der Stoffkonzentrationen im Grundwasser modellhaft berechnet werden (**Bild VI-7**). Die anhand des Bewertungsmodells für definierte Randbedingungen prognostizierten Stoffkonzentrationen im Grundwasser müssen die entsprechenden Grenzwerte (Geringfügigkeitsschwellen) einhalten. Untersuchungen des Forschungsinstituts

an Betonen, für deren Herstellung Zemente aus deutschen Zementwerken eingesetzt wurden, haben gezeigt, dass alle derzeit in Deutschland hergestellten Normzemente diese Anforderungen erfüllen. Für die Untersuchungen wurden jeweils diejenigen Zemente verwendet, die aufgrund der Rohmaterialzusammensetzung Spurenelementgehalte im oberen Bereich aufwiesen. Die Ergebnisse sind daher übertragbar auf alle Zemente, die im Hinblick auf ihre Spurenelementgehalte den verwendeten Zementen vergleichbar sind.

Die Untersuchungen haben auch gezeigt, dass der Abstand zu den Geringfügigkeitsschwellen, zum Beispiel für das Element Chrom bei hohen Chromgehalten im Zement, nur gering ist.

Die in der Ausgabe des DIBt-Merkblatts vom November 2000 enthaltenen Geringfügigkeitsschwellen wurden von einem Unterausschuss der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) überarbeitet und dabei zum Teil drastisch abgesenkt. Außerdem wurden neue Werte für weitere Parameter, wie zum Beispiel Barium, Bor, Thallium und Vanadium, abgeleitet. Die überarbeiteten und ergänzten Geringfügigkeitsschwellen wurden Ende des Jahres 2004 von der Umweltministerkonferenz zur Veröffentlichung freigegeben. In **Tafel VI-2** sind die neuen Geringfügigkeitsschwellen der LAWA den Werten des DIBt-Merkblatts gegenübergestellt.

Die neuen Geringfügigkeitsschwellen und Parameter und die damit verbundenen erheblichen Herabsetzungen der zulässigen Freisetzungsraten werden von der betroffenen Baupraxis nachdrücklich abgelehnt. Dies gilt insbesondere für Werte, die unterhalb der Grenzwerte der Trinkwasserverordnung liegen. Aus Sicht der Industrie hat die LAWA nicht den erforderlichen Nachweis erbracht, dass eine derart weitgehende Vorsorge, die für die Baupraxis eine erhebliche Einschränkung darstellen könnte, notwendig ist. Die LAWA ist jedoch nicht bereit, von diesen Werten abzugehen – mit Ausnahme des Werts für Vanadium, der bis zum 31.12.2007 ausgesetzt ist. Allerdings hat sie einer Anpassung der Randbedingungen bei der Modellberechnung zugestimmt. So wurde der Abstand zum Bauwerk  $X_R$  (Bild VI-7) von ursprünglich 0,30 m auf 2,0 m erhöht. Durch diese Anpassung werden die Auswirkungen der verschärften Anforderungen etwas abgemindert. Trotzdem werden die neuen Geringfügigkeitsschwellen von der Industrie weiterhin abgelehnt, da sie nicht – wie die ursprünglichen Werte – einer

gesetzlichen Regelung (Bodenschutzverordnung) entsprechen, sondern lediglich Empfehlungen der LAWA für nachgeschaltete Behörden darstellen.

Das DIBt-Merkblatt sollte auch dazu dienen, einen gemeinsamen deutschen Standpunkt in die europäischen Diskussionen zur Umsetzung der wesentlichen Anforderung Nr. 3 „Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz“ der europäischen Bauproduktenrichtlinie einzubringen. Dazu hatte das DIBt zugesagt, das Notifizierungsverfahren erst zu eröffnen, wenn eine mit der Industrie abgestimmte Fassung vorliegt. Anfang 2006 wurde dieses Verfahren kurzfristig und entgegen den Vereinbarungen durch das DIBt eingeleitet. Da die eingereichten „Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser Teil I (Entwurf April 2005) und Teil II (Entwurf Dezember 2005)“ zum Beispiel die neuen Geringfügigkeitsschwellen der LAWA enthalten, wurden diese Papiere auf der letzten Sitzung der entsprechenden DIBt-Projektgruppe Boden und Grundwasser im September 2006 industrieseitig einstimmig abgelehnt. Ob bei den weiteren Diskussionen eine für beide Seiten zufriedenstellende Lösung gefunden wird, bleibt abzuwarten.

## Zementgebundene Werkstoffe im Trinkwasserbereich ■

### Europäisches Zulassungssystem für Bauprodukte in Kontakt mit Trinkwasser

Trinkwasser als wichtigstes Lebensmittel darf bis zur Entnahmestelle des Verbrauchers keine unzulässigen Qualitätseinbußen erleiden. Dementsprechend kommt den Werkstoffen in der Trinkwasserspeicherung und -verteilung eine besondere Bedeutung zu. Zementgebundene Werkstoffe haben sich in allen Bereichen der Trinkwasserversorgung seit Jahrzehnten hervorragend bewährt. Die europäische Trinkwasserverordnung legt für alle EU-Mitgliedsstaaten die Mindestanforderungen an das Trinkwasser fest. Deshalb wurde von Trinkwasserhygienikern angestrebt, auch die Anforderungen an Werkstoffe in Kontakt mit Trinkwasser zu harmonisieren. Dazu arbeiteten von den EU-Mitgliedsstaaten autorisierte Trinkwasserhygieniker in der so genannten „Regulators Group for Construction Products in Contact with Drinking Water (RG-CPDW)“ seit 1999 an einem europäischen Zulassungssystem „European Acceptance Scheme (EAS)“. Grundlage für diese Arbeiten war das Mandat M/136, das

sich sowohl auf die Bauproduktenrichtlinie als auch die Trinkwasserrichtlinie bezieht. Das EAS sollte für alle Werkstoffe gelten, die in Kontakt mit Trinkwasser kommen (Kunststoffe, Metalle, zementgebundene Werkstoffe usw.). Dabei sollte das zu erarbeitende Zulassungssystem gewährleisten, dass die vorhandenen nationalen Verbraucherschutzniveaus erhalten bleiben und dass alle üblichen, bewährten Werkstoffe weiterhin eingesetzt werden können.

Nachdem die so genannte Regulatorengruppe etwa fünf Jahre an dem EAS gearbeitet hatte, wurde im Jahr 2004 festgestellt, dass es keine rechtliche Basis für diese Gruppe gibt. Deshalb wurde die Regulatorengruppe in eine Expertengruppe umgestuft, die keine Regelungs- oder Entscheidungsbefugnis besitzt, sondern lediglich die Kommission beraten soll. Des Weiteren wurde klargestellt, dass die europäische Bauproduktenrichtlinie nur Bauprodukte erfasst, die einer harmonisierten technischen Spezifikation entsprechen, und dass die Anforderungen an diese Produkte den einzelnen Mitgliedsstaaten überlassen bleiben. Damit wäre lediglich eine Harmonisierung der Prüfverfahren für Bauprodukte in Kontakt mit Trinkwasser möglich. Allerdings könnten anerkannte, harmonisierte Prüfverfahren den Aufwand für die Industrie erheblich mindern, da keine unterschiedlichen nationalen Prüfmethoden berücksichtigt werden müssen, sondern nur ein Prüfergebnis anhand der entsprechenden nationalen Anforderungen bewertet wird.

Diese geänderten Randbedingungen sollten bei einer im Berichtszeitraum durchgeführten Revision des Mandats M/136 berücksichtigt werden. Allerdings war das überarbeitete Mandat für viele Gesichtspunkte, wie den Gültigkeitsbereich des EAS oder die zu berücksichtigenden Bauprodukte, so widersprüchlich, dass es vom CEN Ende des Jahres 2006 zurückgewiesen wurde. Es bleibt daher abzuwarten, ob diese Widersprüche von der Kommission beseitigt werden können.

Unabhängig von diesen grundsätzlichen Fragestellungen haben die drei bestehenden RG-CPDW-Untergruppen für Kunststoffe, Metalle und zementgebundene Werkstoffe ihre Arbeit fortgeführt, jetzt allerdings als Experten-Untergruppen. Außerdem wurde eine neue Untergruppe für zusammengesetzte Produkte, wie zum Beispiel Wasserhähne, Ventile und Pumpen, eingesetzt.

Die Untergruppe für den Bereich der ze-

mentgebundenen Baustoffe hat insbesondere über die vom CEN/TC 104 „Beton und zugehörige Produkte“ vorgeschlagene Liste bewährter Bestandteile (Approved Constituent List) beraten, die ohne Prüfung für die Herstellung von Betonen eingesetzt werden können. Ziel des ACL-Konzepts ist es, den erforderlichen Prüfumfang für Bauprodukte in Kontakt mit Trinkwasser auf das tatsächlich notwendige Maß zu begrenzen. Zurzeit beinhaltet die ACL eine Zusammenstellung von Bestandteilen, wie zum Beispiel Zemente, Gesteinskörnungen, Betonzusatzstoffe, Betonzusatzmittel usw., die traditionell im Trinkwasserbereich eingesetzt werden und in mindestens einem EU-Mitgliedsstaat für diesen Zweck zugelassen sind.

Die EU-Kommission hat dem Konzept der ACL bereits zugestimmt. So wurde sie gemeinsam mit ähnlichen Listen für Kunststoffe (Positivliste) und für Metalle (Zusammensetzungsliste) in einem Kommissionspapier zusammengefasst und dem Ständigen Ausschuss für das Bauwesen zur Information zugestellt. Welchen Stellenwert die ACL und die weiteren Listen zukünftig einnehmen werden und welches Komitee bzw. welche Expertengruppe über diese Listen entscheidet, ist noch nicht abzusehen. Aus Sicht des Forschungsinstituts bietet das ACL-Konzept eine gute Basis für die weiteren Arbeiten im Trinkwasserbereich. Außerdem könnte dieses Konzept als Modell für die Erstellung von Kriterien zur Einstufung als WT-Produkt im Rahmen der Arbeiten des CEN/TC 351 – zur Emission geregelter gefährlicher Stoffe in Raumluft, Boden, Oberflächenwasser und Grundwasser – dienen.

### DVGW-Arbeitsblatt W 347

Mit dem Arbeitsblatt W 347 „Hygienische Anforderungen an zementgebundene Werkstoffe im Trinkwasserbereich – Prüfung und Bewertung“ der Deutschen Vereinigung des Gas- und Wasserfaches (DVGW) von Oktober 1999 lag erstmalig ein Regelwerk vor, das die speziellen Eigenschaften zementgebundener Werkstoffe in Kontakt mit Trinkwasser sachgerecht berücksichtigt. Aufgrund der Einführung der europäischen Normen für Zement, Gesteinskörnungen, Betonzusatzmittel usw. sowie der Arbeiten in der Ad-hoc-Gruppe AHG 6 „Einfluss zementgebundener Produkte auf Wasser für den menschlichen Gebrauch“ der Arbeitsgruppe WG 3 des CEN/TC 164 „Wasserversorgung“ wurde bereits im Jahre 2002 mit der Überarbeitung des Arbeitsblatts begonnen. Durch die Ausgabe Mai 2006 des Arbeitsblatts W 347 wurden Anpassungen an den Stand

**Tafel VI-3: Gesamtgehalte der Spurenelemente im Zement, bei deren Überschreitung eine Auslaugprüfung erforderlich wird, sowie die entsprechenden Abgabemengen**

Element	Gesamtgehalt im Zement in M-%	Abgabemenge in mg m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
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

der Technik und die entsprechenden europäischen Prüfnormen vorgenommen. Außerdem wurden die Erfahrungen und Erkenntnisse der beteiligten Prüfinstitute mit in die Neufassung aufgenommen. So konnte die Geschmacksprüfung entfallen; weiterhin ist für Bauwerke in Trinkwasserschutzzonen die Prüfung der TOC-Abgabe nicht mehr erforderlich.

Entsprechend des Arbeitsblatts W 347 können Zemente gemäß DIN EN 197-1 und DIN 1164 sowie bauaufsichtlich zugelassene Zemente und Tonerdezemente gemäß DIN EN 14647 eingesetzt werden. Diese Aussage bezieht sich aber nur auf die prinzipielle Einsatzfähigkeit. Darüber hinaus legt das Arbeitsblatt fest, wie für diese Zemente bzw. daraus hergestellte Produkte die trinkwasserhygienische Eignung nachzuweisen ist. Werden die in Tafel IV-3 angegebenen Gesamtgehalte der entsprechenden Elemente eingehalten, sind nur die Färbung, der Geruch, die Trübung und die Neigung zur Schaumbildung sowie die TOC-Abgabe der mit diesen Zementen hergestellten Mörtel oder Betone zu prüfen. Werden die in **Tafel VI-3** angegebenen Elementgehalte überschritten, muss durch Auslaugprüfungen nachgewiesen werden, dass die ebenfalls in der Tafel angegebenen, maximal zulässigen Abgabemengen eingehalten werden. Eine Prüfung der Lithiumabgabe ist nur beim Einsatz lithiumhaltiger Betonzusatzmittel erforderlich.

Die in Tafel VI-3 angegebenen Gesamtgehalte und die zulässigen Abgabemengen werden von deutschen Normzementen bzw. damit hergestellten Mörteln oder Betonen eingehalten. Da die Ausarbeitung und Einführung des europäischen Zulassungssystems (EAS) voraussichtlich noch eine geraume Zeit benötigen wird, ist die Neuausgabe des Arbeitsblatts W 347 in den kommenden Jahren in Deutschland weiterhin die Grundlage für die Beurteilung der hygienischen Eigenschaften zementgebundener Werkstoffe in Kontakt mit Trinkwasser.

## Nachhaltiges Bauen mit Beton ■

Unter einer nachhaltigen Entwicklung versteht man eine ökonomische, soziale und ökologische Entwicklung, die weltweit die Bedürfnisse der gegenwärtigen Generation zufrieden stellt, ohne die Lebenschancen künftiger Generationen zu gefährden. Die Nachhaltigkeit wird im Bauwesen berücksichtigt, wenn funktionsgerechte Bauwerke mit geringen Kosten und geringen Belastungen für die Umwelt erstellt und auf Dauer genutzt werden. Damit das Leitbild der nachhaltigen Entwicklung im Bauwesen umgesetzt werden kann, muss es für die einzelnen Akteure konkretisiert werden. Darüber hinaus sind praxisbezogene Hilfen nötig, um seine Umsetzung zu unterstützen.

### Nachhaltigkeitsinitiative

Die Sozialpartner in der deutschen Zementindustrie haben schon vor einigen Jahren eine gemeinsame Nachhaltigkeitsinitiative ins Leben gerufen (siehe Tätigkeitsbericht 2001-2003). Diese Initiative soll das Leitbild der nachhaltigen Entwicklung in den Unternehmen und Organisationen der deutschen Zementindustrie tiefer verankern. So wurde in einem Projekt die Gestaltung nachhaltiger Transport- und Logistikketten in der Zementindustrie betrachtet. In einem weiteren, vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Vorhaben werden Kenngrößen für ein integriertes Rohstoff- und Naturschutzmanagement entwickelt. Im Berichtszeitraum hat der VDZ die Initiative insbesondere durch die Erarbeitung von Lehrbriefen zur Mitarbeiterausbildung in den Unternehmen unterstützt (siehe Kapitel VII).

### Runder Tisch „Nachhaltiges Bauen“

Nachhaltigkeit soll auch bei Baumaßnahmen des Bundes als Bewertungsmaßstab herangezogen werden. In Deutschland hat das Bundesministerium für Verkehr, Bau-

wesen und Stadtentwicklung (BMVBS) hierzu den Leitfaden „Nachhaltiges Bauen“ entwickelt. Die Arbeiten werden durch die interessierten Kreise über den Runden Tisch „Nachhaltiges Bauen“ begleitet, an dem auch der VDZ gemeinsam mit dem Bundesverband der Deutschen Zementindustrie und dem Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden beteiligt ist.

Die mit der Baustoffherstellung verbundenen Umweltwirkungen sollen über ihre Dokumentation in so genannten Umweltdeklarationen (Environmental Product Declaration / EPD) in die Bewertung des Bauwerks einfließen. Bislang stehen aber nur wenige Umweltdeklarationen von Baustoffen zur Verfügung. Daher plant das BMVBS gemeinsam mit der Industrie kurzfristig eine Aktualisierung der branchengemittelten Baustoffprofile, die im Projekt „Ganzheitliche Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden (GaBi)“ erstellt wurden (siehe Tätigkeitsbericht 1996-1999). In ihnen sind bereits die für eine Umweltdeklaration wesentlichen Parameter berücksichtigt.

In einem Fachgespräch beim BMVBS wurden diskutiert, wie die Lebensdauer von Bauteilen in die wirtschaftliche und ökologische Bewertung von Bauwerken eingeht. Für tragende Bauteile, die während der Bauwerksnutzung kaum ausgetauscht werden können, sind lange Mindestlebensdauern entscheidend. Für auswechselbare Bauteile wie beispielsweise Fenster ist eher ihre mittlere Lebensdauer für Nachhaltigkeitsbetrachtungen wichtig. In jedem Fall hängt die Lebensdauer des Bauteils stark von der jeweiligen Einbausituation und der Ausführungsqualität ab. Daher können Tabellen für Bauteile, in denen Bauteillebensdauern nur sehr allgemein in Abhängigkeit der Baustoffwahl angegeben sind, lediglich verzerrt die Realität widerspiegeln.

### Normung zum nachhaltigen Bauen

Die internationale Normenorganisation ISO arbeitet schon seit einigen Jahren an mehreren Normen zum nachhaltigen Bauen. In einer technischen Spezifikation (TS) wird der Rahmen einer Umweltsystembewertung von Bauwerken abgesteckt, konkrete Anforderungen werden aber kaum gestellt. Dabei werden die Ökobilanz eines Gebäudes, aber auch das Innenraumklima, die lokale Umgebung des Bauwerks und die Gebäudebewirtschaftung angesprochen. Der Normentwurf zur Umweltdeklaration von Bauprodukten enthält u. a. eine Liste von verpflichtend anzugebenden Indikatoren. Diese entsprechen weitgehend den in Deutschland durch das GaBi-Projekt etablierten Parametern.



Aufbauend auf die ISO-Arbeiten werden im Auftrag der EU-Kommission durch die europäische Normenorganisation CEN detailliertere Normen erstellt. Ausgangspunkt ist der Wunsch nach einer weitgehenden Harmonisierung der Umweltdeklarationen von Bauprodukten auf europäischer Ebene, die in einem ganzen Normenpaket geregelt werden sollen (Bild VI-8). Der VDZ achtet durch seine Mitarbeit im Spiegelgremium des DIN darauf, dass sich die in Deutschland etablierten und als sinnvoll erachteten Vorgehensweisen auch in der europäischen Normung wiederfinden. Auch müssen die betrachteten Umweltaspekte gemeinsam mit wirtschaftlichen und sozialen Gesichtspunkten ausgewogen in die Nachhaltigkeitsbewertung eines Bauwerks einmünden, in der auch seine technischen Eigenschaften angemessen berücksichtigt werden.

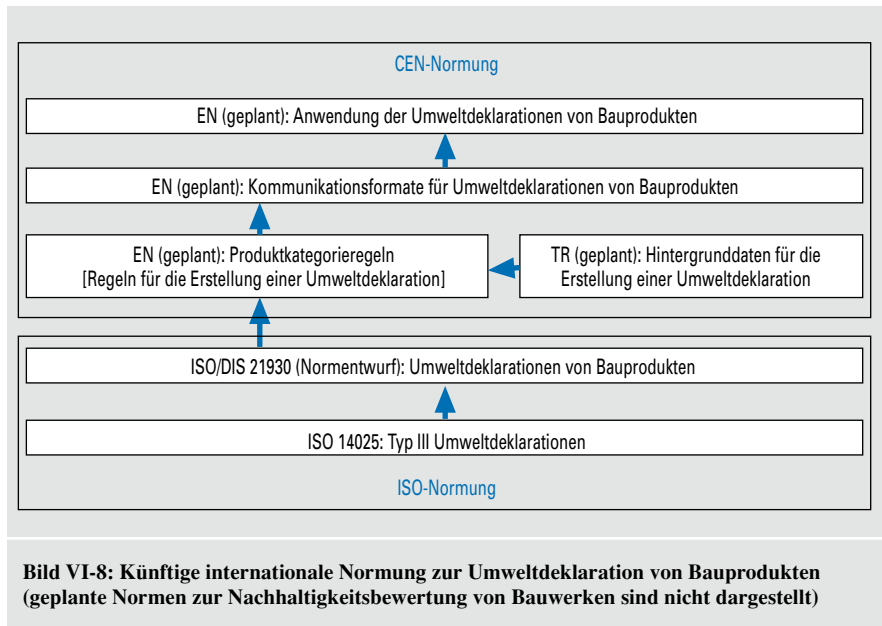
**Nachhaltiger Betonbau**

Die Betonbauweise nimmt aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit, ihrer Anwendungsbreite und der großen eingesetzten Mengen an Baumaterial eine herausragende Stellung im Bauwesen ein. Deswegen ist die Umsetzung des nachhaltigen Betonbaus von besonderer Bedeutung. Der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) bereitet mittelfristig „Grundsätze zum nachhaltigen Bauen mit Beton (GrunaBau)“ vor. Den am Betonbau Beteiligten sollen hiermit Bewertungsregeln und technische Empfehlungen zum nachhaltigen Bauen mit Beton an die Hand gegeben werden. Darüber hinaus sollen mit dem Grundsatzpapier Vorgaben für einen nachhaltigen Betonbau geschaffen werden, die direkten Eingang in die künftigen nationalen und internationalen Normen und Richtlinien des Betonbaus finden sollen. Hierbei wird dem gesamten Lebensweg eines Betonbauwerks von der Herstellung der Ausgangsstoffe über die Erstellung des Bauwerks und seine Nutzung bis zum Rückbau und Recycling Bedeutung zukommen. Zur Entwicklung der GrunaBau hat der DAfStb ein Verbundvorhaben „Nachhaltig Bauen mit Beton“ initiiert, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wird.

**Verwertung des Betonbrechsands**

In der ersten Phase des Verbundvorhabens wurden in einem Teilvorhaben unter Federführung des Forschungsinstituts die Potenziale des Sekundärstoffeinsatzes im Betonbau untersucht, Kosten und Einflüsse auf die Umwelt zu mindern.

Am Beispiel des potenziellen Einsatzes



**Tafel VI-4: Chemische Zusammensetzung der Betonbrechsande (Nr. 1 bis 5) sowie der aus Brechsand Nr. 1 gewonnenen Fraktionen (Leichtfraktion 1L und Feinstfraktion 1F), Angaben in M.-%, glühverlustfrei**

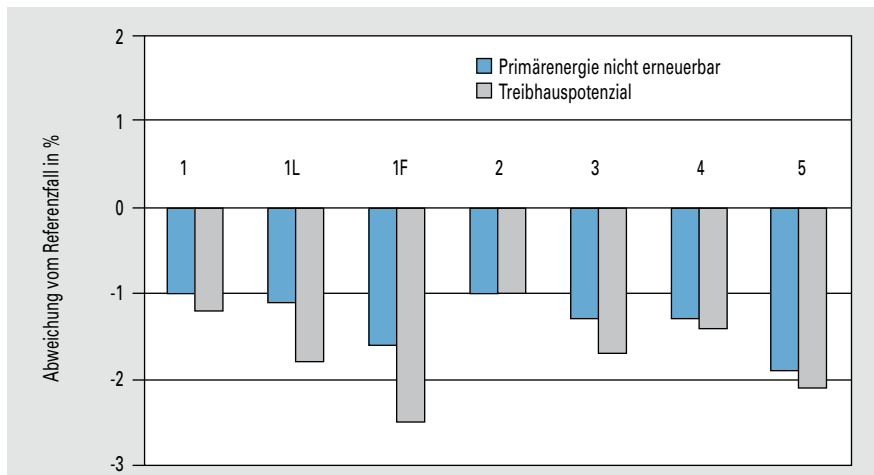
	Betonbrechsand						
	Nr. 1	Nr. 1L	Nr. 1F	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
SiO <sub>2</sub>	80,44	71,09	54,73	79,51	72,74	62,03	55,43
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,07	6,95	10,11	5,60	4,38	6,07	3,37
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,02	2,04	3,62	2,30	2,02	2,24	1,64
CaO	5,69	12,27	21,48	9,08	16,81	23,94	36,81
MgO	1,72	2,72	3,59	0,76	1,42	2,41	0,76

von Betonbrechsand als Sekundärstoff in der Zementklinkerherstellung zeigen die durchgeführten Arbeiten, wie die Nachhaltigkeitsbewertung in die bislang schon gängige Bewertung seiner Einsatzmöglichkeiten eingebunden werden kann. Betonbrechsand mit einer Körnung von 0 bis 2 mm fällt bei der Gewinnung von rezyklierten Gesteinskörnungen aus Betonbruch an, kann aber im Gegensatz zu größeren Körnungen aus betontechnologischen Gründen im Allgemeinen nicht ohne weitere Aufbereitung im Beton eingesetzt werden. Die potenzielle Verwendung des Betonbrechsands als Rohstoff in der Zementklinkerherstellung würde die vollständige und hochwertige Wiederverwertung des Betons erlauben. Dabei kann nicht carbonatisierter Zementstein im Betonbrechsand zusätzlich zu einer CO<sub>2</sub>-Minderung führen.

Chemische Analysen von in Deutschland verfügbaren Betonbrechsanden zeigen erwartungsgemäß einen sehr hohen Siliziumanteil, der im Wesentlichen aus dem

Sandanteil des Altbetons stammt. In **Tafel VI-4** ist die chemische Zusammensetzung der Betonbrechsande, die bei den nachfolgenden Untersuchungen betrachtet werden, angegeben. Solche Materialien können bei der Zementklinkerherstellung hauptsächlich als Ersatz von Sand eingesetzt werden. Dieser wird in Deutschland mit durchschnittlich 3 % in der Mischung der Rohmaterialien eingesetzt. Brechsande mit höheren Calciumoxidanteilen können zusätzlich auch Calciumträger ersetzen.

Die Auswirkungen des Betonbrechsandeinsatzes auf die Zementklinkerherstellung wurden durch eine rechnergestützte Simulation des Klinkerbrennprozesses ermittelt. Diese Simulation ermöglicht eine Beurteilung verfahrens- und betriebstechnischer Prozessgrößen, wie beispielsweise der Energie- und Stoffflüsse innerhalb des Ofensystems. Darüber hinaus können insbesondere Aussagen zum Einfluss des Brechsandeinsatzes auf den Energieverbrauch und die Emissionen der Zementklinkerherstellung getroffen werden. In den



**Bild VI-9: Potenzielle Änderung der Nachhaltigkeitsindikatoren „Primärenergie, nicht erneuerbar“ und „Treibhauspotenzial“ durch den Einsatz verschiedener Betonbrechsände (Nr. 1 bis 5) sowie der aus Brechsand Nr. 1 gewonnenen Fraktionen (Leichtfraktion 1L und Feinstfraktion 1F) in einem typischen Zementklinkerbrennprozess**

Simulationsstudien wurde zunächst ein Referenzszenario mit Einsatz einer typischen Rohmaterialmischung ohne Brechsand berechnet. Darauf aufbauend wurde das Referenzrohmaterial teilweise durch unterschiedliche Brechsände substituiert und die Herstellung der Zementklinker berechnet. Dabei wurden die Produktqualität, wie der Gehalt an wichtigen Klinkerphasen, sowie verfahrens- und betriebstechnische Aspekte, wie die anzustrebenden Temperaturen an wichtigen Stellen des Ofensystems, berücksichtigt. Im Vergleich der berechneten Variationen mit dem Referenzfall zeigen sich z. T. Minderungspotenziale von über 2 % für den Energiebedarf und die Emission von CO<sub>2</sub>.

Durch die zusätzliche Betrachtung der Vorkettenprozesse, wie z. B. die Erzeugung des benötigten Stroms, können die entsprechenden Nachhaltigkeitsindikatoren „Primärenergie, nicht erneuerbar“ und „Treibhauspotenzial“ berechnet werden (Bild VI-9). In der Praxis werden diese Minderungspotenziale insbesondere dann genutzt werden können, wenn der Bedarf an einem Siliziumträger im Zementwerk mit dem Brechsandangebot aus einer geeigneten Aufbereitungsanlage zusammentrifft. Den Randbedingungen für einen besonders erfolgversprechenden Einsatz wird in der zweiten Projektphase nachgegangen, auch um allgemein die Erfordernisse eines nachhaltigen und praxistgerechten Sekundärstofffeinsatzes in die GrunaBau einbeziehen zu können.

## Mess- und Prüfverfahren ■

Für die Gehaltsbestimmung geregelter gefährlicher Stoffe in Produkten oder deren mögliche Freisetzung bei der Produktherstellung bzw. aus Produkten ist eine leistungsfähige Analysetechnik unerlässlich. Das Forschungsinstitut verfügt bereits seit vielen Jahren über entsprechende Analysegeräte. Ursprünglich wurde die anorganische und organische Spurenanalytik im Institut vor allem für Forschungsprojekte und zur Klärung analytischer Fragestellungen durchgeführt. In den vergangenen zehn Jahren ist das Forschungsinstitut für diese Analysenaufgaben auch immer stärker als Dienstleister gefragt.

Die Erhöhung des Dienstleistungsanteils im Leistungsspektrum erfordert Werkzeuge, die neben hoher Qualität auch eine schnelle Auftragsbearbeitung ermöglichen. In verschiedenen Analyselaboratorien des Forschungsinstituts wurde daher der Gerätepark für anorganische und organische Spurenanalyse verjüngt und erweitert. Das ICP- und das GC-Massenspektrometer wurden durch neue, leistungsstarke Analytoren ersetzt. Für die in den letzten Jahren stetig gestiegene Zahl von Quecksilberanalysen wurde ein weiterer Quecksilberanalysator angeschafft. Damit wurde das analytische Leistungsspektrum des Forschungsinstituts maßgeblich erweitert.

## Qualität und Quantität vereinen

Die Bestimmung von anorganischen und organischen Spurenbestandteilen stellt nach wie vor ein sehr anspruchsvolles Gebiet der quantitativen analytischen Chemie dar. Das Instrumentarium des Forschungsinstituts der Zementindustrie

für Spurenanalytik war zunächst weniger auf Durchsatz als auf die Erarbeitung von Strategien für eine hochwertige Analytik ausgelegt. Mit der wachsenden Zahl von Kunden stiegen auch die Anforderungen an den Probendurchsatz und die Bearbeitungszeit. Der höhere Probendurchsatz darf sich allerdings nicht negativ auf die Qualität der Analyseergebnisse auswirken. Der Kunde benötigt heute belastbare Analyseergebnisse, die schnell vorliegen müssen. Im Forschungsinstitut wird dies nicht allein mithilfe leistungsstarker Analytoren, sondern auch durch die bewährte enge Zusammenarbeit der einzelnen Abteilungen und kurzen Wege zwischen den Fachleuten realisiert.

## Schwerpunkte Emissionsanalytik und Stoffbilanzierung

Ein besonderer Einsatzschwerpunkt für die neuen Analytoren liegt in der Emissionsüberwachung. Die große Zahl der von der Emissionsmessstelle des Forschungsinstituts bei Emissionsmessungen in den Zementwerken genommenen Proben wird mit dem ICP-Massenspektrometer (ICP-MS) auf ihre Gehalte an Metall- und Halbmethylspurenelementen untersucht. Ein GC-Massenspektrometer (GC-MS) dient der Bestimmung der organischen Emissionsbestandteile.

Die Zahl von Proben für Quecksilberbestimmungen hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Ursache dafür sind die erforderlichen Kalibrierungen von stationären Analytoren für die kontinuierliche Quecksilberbestimmung, die vom Forschungsinstitut mit diskontinuierlichen Quecksilberbestimmungen begleitet werden. Für die Bewältigung dieses erhöhten Probenaufkommens wurde ein zweiter Quecksilberanalysator angeschafft.

Die hohe Empfindlichkeit der Analytoren ist zudem bei der Erstellung von Stoffbilanzen für Industrieanlagen unter Berücksichtigung von Spurenbestandteilen unentbehrlich. Häufig sind die Gehalte von Spurenbestandteilen in den Ausgangsstoffen nur sehr gering, während sie sich in manchen Stoffteilströmen deutlich anreichern. Für eine schlüssige Stoffbilanz müssen die interessierenden Bestandteile in allen Stoffteilströmen richtig erfasst werden. Dazu sind leistungsstarke und zuverlässige Analytoren erforderlich.

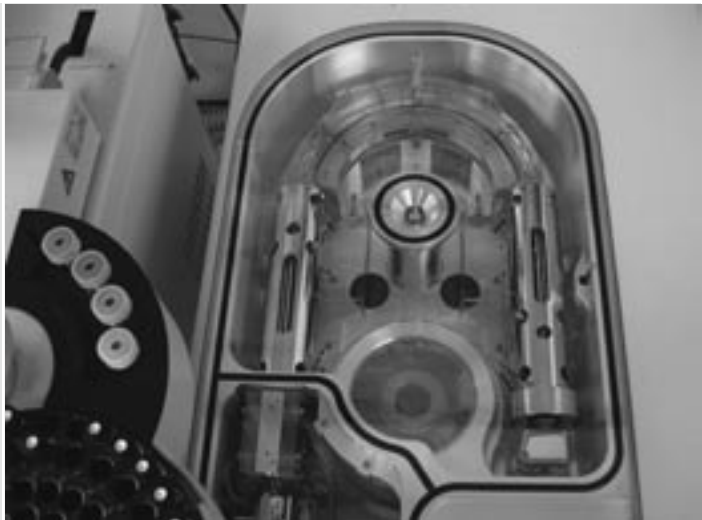
**Angebot erweitert**

Aufgrund verbesserter Technik ermöglichen die neuen Analysatoren ein störungsärmeres Messen der Proben bzw. die automatische softwaregesteuerte Durchführung erforderlicher Korrekturen von Messstörungen. Das neue ICP-Massenspektrometer (**Bild VI-10**) ist durch einen neuen, patentierten „Ionenspiegel“ in der Lage, mehr Elemente zu messen als das Vorgängermodell. Damit wird die Zahl von erforderlichen Vergleichsmessungen mit anderen Metall-/Halbmetallspurenanalyseverfahren wie der AAS reduziert. Mit dem neuen GC-Massenspektrometer, das im so genannten MS/MS-Modus betrieben werden kann, können im Forschungsinstitut zukünftig weitere organische Spurenbestandteile bestimmt werden (**Bild VI-11**). Neben einfachen aromatisch-organischen Emissionsbestandteilen (BTEX) können nun auch quantitative PCB-, PAK- und Pestizidanalysen sowie qualitative Übersichtsanalysen für verschiedenartige, auch sehr schwer analysierbare Proben angeboten werden.

**Bild VI-10:** Probeneinlasssystem des neuen ICP-Massenspektrometers



**Bild VI-11:** Blick auf die gekoppelten Quadrupolmassenseparatoren des neuen GC-Massenspektrometers



# VII

## Verantwortung für Mitarbeiter

Die Förderung der Arbeitssicherheit in den Zementwerken gehört zu den satzungsgemäßen Aufgaben des VDZ. Dabei werden Maßnahmen zur Verbesserung der Arbeitssicherheit vom VDZ-Ausschuss Umwelt und Verfahrenstechnik entwickelt und eingeleitet, der in seiner Arbeit vor allem durch den VDZ-Arbeitskreis Arbeitssicherheit und das Forschungsinstitut unterstützt wird. Seit 1965 werden die Unfallzahlen in den deutschen Mitgliedswerken 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. Außerdem hat der Arbeitskreis Arbeitssicherheit gemeinsam mit dem Forschungsinstitut Sicherheits-Merkblätter und -Prüflisten ausgearbeitet und die aktuellen sicherheitstechnischen Probleme bei den Werksbesuchen erörtert. Diese haben mit dazu beigetragen, den Arbeitsschutz in den Werken zu verbessern. Insbesondere hat der Arbeitskreis ein Merkblatt zu den empfohlenen Unterweisungen für Zementwerksmitarbeiter erstellt und sich mit der Umsetzung der neuen Gefahrstoffverordnung beschäftigt.

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 22. Industriemeister-Lehrgang „Kalk/Zement“ mit zwölf Teilnehmern erfolgreich abgeschlossen. Damit kann der VDZ Anfang 2007 auf 49 Jahre erfolgreicher Weiterbildung zum Industriemeister zurückblicken. In dieser Zeit haben an 30 Lehrgängen insgesamt 820 Personen mit Erfolg teilgenommen.

Außerdem wurde die Weiterbildung zum Produktionssteuerer fortgesetzt. Im Berichtszeitraum wurde ein Lehrgang mit 15 Teilnehmern durchgeführt. Seit 1998 bietet der VDZ im Rahmen seines Weiterbildungswerks zusätzlich zu den bislang bereits durchgeführten Industriemeister- und Produktionssteuerer-Lehrgängen sowie den Arbeitssicherheits-Seminaren 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 Betontechnologie und die Betonverarbeitung. In den Jahren 2005 und 2006 wurden jeweils acht Seminare durchgeführt. Für das Jahr 2007 sind sieben Seminare vorgesehen.



## Arbeitssicherheit ■

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. Der VDZ-Ausschuss Umwelt und Verfahrenstechnik entwickelt und leitet Maßnahmen zur Verbesserung der Arbeitssicherheit ein, 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 Maßnahmen zum Arbeitsschutz in den Werken und die Zusammenarbeit mit dem VDZ und seinem Forschungsinstitut haben in besonderem Maß dazu beigetragen, dass die Unfallhäufigkeit in den deutschen Zementwerken in den vergangenen 30 Jahren auf ein Drittel abgenommen hat. Bereits 1984 lag die Unfallhäufigkeit aller Mitarbeiter auf einem sehr niedrigen Niveau von rund 20 Unfällen je einer Million geleisteter Arbeitsstunden. Die Rate entsprach etwa der der chemischen Industrie. Die mittlere Unfallhäufigkeitsrate der deutschen Zementindustrie lag im Jahr 2006 etwa 64 % unter der Unfallhäufigkeit aller Mitgliedsunternehmen der Steinbruchs-Berufsgenossenschaft (StBG) und rund 37 % 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 ein Vollarbeiter z. B. im Jahr 2005 rund 1 570 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 2005 nur noch bei 0,3 %.

### VDZ-Unfallstatistik

Seit 1965 werden die Zahlen der meldepflichtigen Betriebs- und Wegeunfälle in den deutschen Mitgliedswerken vom Forschungsinstitut jährlich erfasst und statis-

**Tafel VII-1: Unfallkennzahlen für die Belegschaft im Betrieb der VDZ-Mitgliedswerke in den Jahren 1969, 2005 und 2006**

Jahr	1969	2005	2006
Anzahl der erfassten Werke	98	50	50
Zementproduktion in Mio. t	34,3	31,0	31,9 <sup>1)</sup>
<b>Belegschaft im Betrieb</b>			
Anzahl der Arbeitnehmer	15 190	5 356	4 975
Geleistete Arbeitsstunden	31 339 177	8 798 507	8 228 340
Produktionsbezogener Lohnstundenaufwand in h/t	0,91	0,28	0,26
Meldepflichtige Betriebsunfälle	1 376	96	121
Unfallhäufigkeitsrate (Unfälle je 1 Mio. Arbeitsstunden)	43,90	10,91	14,71
Kalenderausfalltage durch meldepflichtige Betriebsunfälle	31 935	3 518	3 645
Ausgefallene Arbeitstage je Arbeitnehmer	2,10	0,66	0,73
Kalenderausfalltage je Betriebsunfall	23,20	36,65	30,12
100-Mann-Quote (Unfälle je 100 Arbeitnehmer)	9,10	1,79	2,43
Meldepflichtige Wegeunfälle	180	17	15
Kalenderausfalltage durch meldepflichtige Wegeunfälle	5 822	288	638
Unfallhäufigkeitsrate der Gesamtbelegschaft	37,70	9,51	12,38

<sup>1)</sup> vorläufige Zahl

tisch ausgewertet. Die wichtigsten Ergebnisse und Kennzahlen der Unfallstatistiken aus den Jahren 2005 und 2006 sind in **Tafel VII-1** zusammengestellt. Zum Vergleich und zur Kennzeichnung der Entwicklung des Unfallgeschehens wurden in der ersten Spalte der Tafel die entsprechenden Zahlen des Jahres 1969 mit aufgeführt, in dem erstmalig die Unfälle der Zementindustrie statistisch ausgewertet wurden. 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 2005 um ca. 0,9 % und im Jahr 2006 um 7,1 % jeweils gegenüber dem Vorjahr abgenommen. Die Zahl der geleisteten Arbeitsstunden ging im Jahr 2005 um 3,1 % und im Jahr 2006 um ca. 6,4 % zurück.

Aus diesem Grund hat die Zahl der jährlich pro Arbeitnehmer geleisteten Arbeitsstunden von rund 1 680 im Jahr 2004 auf 1 643 im Jahr 2005 abgenommen. Im Jahr 2006 lagen die pro Arbeitnehmer geleisteten Arbeitsstunden mit 1 654 etwas höher. Aus der Tafel geht hervor, dass die Produktion im Berichtszeitraum von 31,0 Mio. t im Jahr 2005 auf 31,9 Mio. t in 2006 anstieg. Daraus ergibt sich der produktionsbezogene Arbeitsstundenaufwand

von 0,28 h/t im Jahr 2005 und 0,26 h/t im Jahr 2006. Die Zahl der meldepflichtigen Betriebsunfälle stieg von 96 im Jahr 2005 auf 121 im Jahr 2006, d. h. um ca. 26 %. Die mittlere Unfallhäufigkeitsrate (Zahl der meldepflichtigen Betriebsunfälle je 1 Mio. Arbeitsstunden) aller Werke hat im Jahr 2005 mit 10,91 den bisher niedrigsten Stand erreicht. Aufgrund der gestiegenen Unfallzahlen ergab sich für das Jahr 2006 mit 14,71 eine deutlich höhere Unfallhäufigkeitsrate.

In den Jahren 2005 und 2006 konnten jeweils elf Werke mit Klinkerproduktion eine Unfallhäufigkeitsrate von 0,0 erreichen (**Bild VII-1** und **Tafel VII-1**). Für die gewerblichen Arbeitnehmer und die Gesamtzahl der Angestellten gemeinsam ergab die Rechnung für das Jahr 2005 eine Unfallhäufigkeitsrate von 9,51 und für das Jahr 2006 von 12,38.

Die durchschnittliche Zahl der durch meldepflichtige Betriebsunfälle verursachten Kalenderausfalltage ist von 36,65 im Jahr 2005 auf 30,12 in 2006 um rund 17,8 % gesunken. Die wirtschaftliche Bedeutung der Betriebsunfälle lässt sich auch mithilfe 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 hat von 0,66 im Jahr 2005 auf 0,73 in 2006 zugenommen. Die 100-Mann-Quote, das ist die Zahl der Betriebsunfälle bezogen auf 100 Mitarbeiter im Betrieb, hat im Jahr 2005 mit 1,79 den bisherigen Tiefststand erreicht und stieg im Jahr 2006 auf 2,43. Im Vergleich dazu ergab sich z. B. für die bei der Steinbruchs-Berufsgenossenschaft versicherten Unternehmen im Jahr 2005 eine 100-Mann-Quote von nur 4,72, entsprechend einer Unfallhäufigkeitsrate von 30,10. Die Zahl der meldepflichtigen Wegeunfälle schwankte im Berichtszeitraum zwischen 17 im Jahr 2005 und 15 im Jahr 2006.

### Förderung der Arbeitssicherheit

In den vergangenen zwei Jahren wurden sechs Sicherheits-Merkblätter (Nr. 100 bis 105) mit den Beschreibungen typischer und besonders bemerkenswerter Betriebsunfälle sowie sechs Sicherheits-Prüflisten (Nr. 80 bis 85) 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. Die Auszeichnung besteht aus einer Tafel und dem Symbol für die Sicherheitsarbeit des VDZ 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 Gefährdungspotenziale 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.

### Sicherheitsseminare

Der Verlauf der Unfallkennzahlen während der letzten Jahre zeigt deutlich, dass sich die Arbeitssicherheit durch die erheblichen Bemühungen der Werke mit Unterstützung durch den Arbeitskreis und das For-

**Tafel VII-2: Im VDZ-Arbeitssicherheits-Wettbewerb ausgezeichnete Werke mit Klinkerproduktion in den Jahren 2005 und 2006**

	2005	2006
1. Platz	CEMEX WestZement GmbH Werk Beckum-Mersmann Unfallhäufigkeitsrate: 0,0	CEMEX WestZement GmbH Werk Beckum-Kollenbach Unfallhäufigkeitsrate: 0,0
	CEMEX OstZement GmbH Werk Rüdersdorf Unfallhäufigkeitsrate: 0,0	CEMEX WestZement GmbH Werk Beckum-Mersmann Unfallhäufigkeitsrate: 0,0
	Dyckerhoff AG Werk Geseke Unfallhäufigkeitsrate: 0,0	Dyckerhoff AG Werk Amöneburg Unfallhäufigkeitsrate: 0,0
	Dyckerhoff AG Werk Göllheim Unfallhäufigkeitsrate: 0,0	Dyckerhoff AG Werk Geseke Unfallhäufigkeitsrate: 0,0
	Dyckerhoff AG Werk Lengerich Unfallhäufigkeitsrate: 0,0	Dyckerhoff AG Werk Göllheim Unfallhäufigkeitsrate: 0,0
	Dyckerhoff AG Werk Neubekum Unfallhäufigkeitsrate: 0,0	HeidelbergCement AG Werk Lengfurt Unfallhäufigkeitsrate: 0,0
	HeidelbergCement AG Werk Burglengenfeld Unfallhäufigkeitsrate: 0,0	Holcim (Deutschland) AG Werk Höver Unfallhäufigkeitsrate: 0,0
	HeidelbergCement AG Werk Schelklingen Unfallhäufigkeitsrate: 0,0	Lafarge Zement Karsdorf GmbH Werk Sötenich Unfallhäufigkeitsrate: 0,0
	Lafarge Zement Karsdorf GmbH Werk Sötenich Unfallhäufigkeitsrate: 0,0	Lafarge Zement Wössingen GmbH Unfallhäufigkeitsrate: 0,0
	Schwenk Zement KG Werk Allmendingen Unfallhäufigkeitsrate: 0,0	Schwenk Zement KG Werk Mergelstetten Unfallhäufigkeitsrate: 0,0
Schwenk Zement KG Werk Mergelstetten Unfallhäufigkeitsrate: 0,0	Teutonia Zementwerk AG Unfallhäufigkeitsrate: 0,0	
2. Platz	CEMEX WestZement GmbH Werk Beckum-Kollenbach Unfallhäufigkeitsrate: 4,61	Lafarge Zement Karsdorf GmbH Werk Karsdorf Unfallhäufigkeitsrate: 3,48
3. Platz	HeidelbergCement AG Werk Wetzlar Unfallhäufigkeitsrate: 5,90	Deuna Zement GmbH Unfallhäufigkeitsrate: 3,81



**Bild VII-1:  
Auszeichnungen  
der Sieger im  
VDZ-Arbeitssi-  
cherheits-Wett-  
bewerb 2005**

schungsinstitut enorm verbessert hat. Zur weiteren Steigerung der Arbeitssicherheit dürfen die Anstrengungen aller Mitarbeiter aber nicht nachlassen, sondern müssen kontinuierlich 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 es, die Kenntnisse über sicheres Arbeiten vor allem in Bereichen mit höherem Unfallrisiko zu verbessern, bemerkenswerte Unfälle zu ermitteln und Anregungen für eigene Maßnahmen zur Verbesserung der Arbeitssicherheit zu vermitteln. 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, sie dauern jeweils etwa zwei Tage und werden in Gruppen zu 15 bis 20 Teilnehmern außerhalb der Betriebe von Seminarleitern der StBG organisiert und durchgeführt. Die Seminare werden seit 1993 als Dauereinrichtung mit sechs Veranstaltungen pro Jahr angeboten. Die Referenten sind dafür qualifizierte Mitarbeiter der StBG. Die in bestimmten Zeitabschnitten wechselnden Programmtiteln werden vor allem vom VDZ-Arbeitskreis Arbeitssicherheit zusammengestellt und ausgearbeitet.

### Neue Gefahrstoffverordnung

Die neue Gefahrstoffverordnung ist am 01.01.2005 in Kraft getreten und muss jetzt umgesetzt werden. Inhaltliche Schwerpunkte der neuen Gefahrstoffverordnung sind eine Informationsbeschaffung zur Einstufung der Gefährlichkeit eines Stoffs und eine Gefährdungsbeurteilung zu den Tätigkeiten beim Umgang mit diesen Stoffen. Je nach Gefährlichkeit eines Stoffs bzw. der entsprechenden Tätigkeiten sind die Stoffe in vier Schutzstufen einzustufen. Durch die neue Gefahrstoffverordnung werden außerdem die arbeitsmedizinischen Untersuchungen ausgedehnt und die bisher aus technischen Gesichtspunkten abgeleiteten Grenzwerte durch risikobezogene Arbeitsplatzgrenzwerte ersetzt.

Zur Umsetzung der neuen Gefahrstoffverordnung empfiehlt es sich, zuerst das Gefahrstoffverzeichnis zu aktualisieren bzw. auf Vollständigkeit zu prüfen und für die Stoffe entsprechende aktuelle Sicherheitsdatenblätter zu beschaffen. Weiterhin sind die vorhandenen bzw. maximal bevorrateten Mengen zu erfassen und die Mitarbeiter, die mit den Stoffen umgehen, zuzuordnen. Gemäß Gefahrstoffverordnung sind die Stoffe in Schutzstufen einzuordnen. Weithin sollten in die Gefahrstoffliste auch die R- bzw. S-Sätze, die Gefahrstoffkennzeichnung, die Abfallschlüsselnummern, die Wassergefährdungsklasse und Explosionskenngrößen aufgenommen und auf die vorhandenen Betriebsanweisungen verwiesen werden. Im Rahmen der Einstufung der Gefahrstoffe in Schutzstufen sollten auch die Betriebsanweisungen zu den Gefahrstoffen aktualisiert werden.

Nach der Informationsbeschaffung und insbesondere der Auswertung der R- und ggf. der S-Sätze kann die Einstufung in eine Schutzstufe erfolgen und entsprechende Schutzmaßnahmen können festgelegt werden. Dabei sind auch Gefahren bei Hitze- oder Kälteeinwirkung zu berücksichtigen.

### Aktualisiertes Sicherheitsdatenblatt 2005

Rechtliche Änderungen, wie z. B. die Umsetzung der Europäischen „Chromatrichtlinie“ 2003/53/EG, erforderten eine Anpassung der gebräuchlichen Sicherheitsdatenblätter. Gemeinsam mit Vertretern von Herstellerverbänden (Bauchemie, Mörtel) und Arbeitsschutzbehörden wurde der Inhalt des aktualisierten Sicherheitsdatenblatts abgestimmt. Das somit geschaffene national harmonisierte Mustersicherheitsdatenblatt gilt für chromatreduzierte Zemente und chromatreduzierte zementhaltige Zubereitungen. Die wichtigsten Änderungen betreffen die folgenden Punkte:

- Für alle chromatreduzierten Zemente entfällt die Kennzeichnung mit dem Gefahrenhinweis R43 „Sensibilisierung durch Hautkontakt möglich“. Im Sicherheitsdatenblatt wird jedoch darauf hingewiesen, dass für die Wirksamkeit der Chromatreduktion eine sachgerechte Lagerung und die Beachtung des Haltbarkeitsdatums vorausgesetzt werden.
- Der allgemeine Staubgrenzwert für den alveolengängigen Anteil des Staubs (A-Wert) beträgt nach der neuen Regelung 3 mg/m<sup>3</sup>.
- Zemente und zementhaltige Zubereitungen sind mit dem Sicherheitsrat-

schlag S39 „Bei der Arbeit geeignete Schutzbrille/Gesichtsschutz tragen“ zu kennzeichnen. Dieser Ratschlag ergibt sich aus der Einstufung mit dem Gefahrenhinweis R41 „Gefahr ernster Augenschäden“ und wurde von den Arbeitsschutzbehörden gefordert.

- Die Angaben zur Toxikologie sind ausführlicher gestaltet.

Für chromathaltige Zemente, die im Rahmen der Ausnahmeregelung von der Chemikalienverbotsverordnung in Verkehr gebracht werden, ist ebenfalls ein modifiziertes Sicherheitsdatenblatt erstellt worden. Beide Mustersicherheitsdatenblätter stehen auf der VDZ-Internetseite als Vorlage zur Verfügung.

## 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 acht 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 2007 haben 546 Personen mit Erfolg an 22 Industriemeister-Lehrgängen „Kalk/Zement“ teilgenommen (**Bild VII-2** und **Tafel VII-3**). Insgesamt kann der VDZ damit auf 49 Jahre erfolgreicher Weiterbildung zum Industriemeister zurückblicken. Die Lehrgänge wurden bisher als Internats-Lehrgänge in den Räumen der Schulungsstätte in Düsseldorf-Hassels durchgeführt. Die Schulungsstätte Hassels wird Mitte 2007 geschlossen. Mit dem Institut für öffentliche Verwaltung wurde ein adäquates und gut eingerichtetes Schulungsgebäude in Hilden, südlich von Düsseldorf, gefunden. Anfang 2007 wurde durch eine Umfrage das Interesse der Werke an einem geplanten 23. Industriemeister-Lehrgang festgestellt, der im Herbst 2007 beginnen und im März 2009 enden würde. Dieser Lehrgang soll wieder als Internatslehrgang in der neuen Schulungsstätte durchgeführt werden.

### 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, sodass 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 2006 wurden in insgesamt zwölf Lehrgängen 263 Personen zu Produktionssteuereuren „Zement“ weitergebildet. Der nächste Lehrgang wird in der Zeit von April bis September 2007 in der Schulungsstätte Düsseldorf-Hassels durchgeführt. Anschließend wird die Schulungsstätte geschlossen und die Lehrgänge finden dann ebenfalls in der oben genannten Schulungsstätte in Hilden statt.

#### Lehrbriefe

Zur Weiterbildung der Produktionsmitarbeiter in den Werken und zur Betreuung der auszubildenden Verfahrensmechaniker wurden in den vergangenen Jahren 47 Lehrbriefe von der VDZ-Arbeitsgruppe „Lehrbriefe“ erstellt. Im Berichtszeitraum wurden 16 Lehrbriefe fertiggestellt, sodass nun alle geplanten Lehrbriefe vorliegen. Die Lehrbriefe 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. **Tafel VII-4** zeigt eine Übersicht über die zur Verfügung stehenden Lehrbriefe. Beispiele einzelner Lehrbriefe können darüber hinaus auf der Intranet-Seite des VDZ eingesehen werden.

Die Lehrbriefe bestehen jeweils aus einem Textteil und einem Bildteil (Foliensatz). Sie sollen geeigneten Werkmitarbeitern (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 beziehen und mit der Tätigkeit der Produktionsmitarbeiter in engem Zusammenhang stehen.



**Bild VII-2: Industriemeister „Kalk/Zement“ nach bestandener Abschlussprüfung im März 2007**

**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	290
	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
	22	2005/2007	11	1	12
Summe			215	41	256
Insgesamt			669	151	820

Tafel VII-4: Thematische Aufüstung 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	Brandschutz				X
3.9	Explosionsschutz				X
4	Zementproduktion				
4.1	Zementmahlanlage	X			
4.2	Rohmühlen			X	
4.3	Wälzmühlen			X	
4.4	Gutbettwalzenmühlen			X	
4.5	Sichter			X	
4.6	Zement-Einsatzstoffe, Produktprogramm, Zementanwendung	X			
4.7	Zement-Mischanlage				X
4.8	Zement-Kühlung				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	Prozessesstechnik			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	

### 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. Das aktuelle Kursangebot 2007 wurde den Mitgliedswerken sowohl in Form einer Broschüre als auch über das Internet unter der VDZ-Homepage [www.vdz-online.de](http://www.vdz-online.de) bekannt gemacht.

Immissionsschutzbeauftragte müssen gemäß der 5. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (5. BImSchV) mindestens alle zwei 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 sieben 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 CO<sub>2</sub>-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 zwei Jahren mit jeweils aktuellen Themen durchgeführt.

Das Seminar „Einführung in die Umwelttechnik“ wird ebenfalls im Abstand von zwei Jahren, abwechselnd mit dem Fortbildungsseminar für Immissionsschutzbeauftragte, durchgeführt. Das wegen mangelnder Nachfrage im Jahr 2003 ausgefallene Seminar wurde 2005 durchgeführt. 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 produktions-integrierter Umweltschutz behandelt. Die Vorträge werden durch praktische Übungen zur Emissions- und Immissionsmesstechnik ergänzt. Das Seminar hat die staatliche Anerkennung als Grundlehrgang für zukünftige Immissionsschutzbeauftragte.

Ziel des viertägigen 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 seit 2004 in zweijährigem Abstand angeboten. Nach 2006 wird das nächste Seminar 2008 stattfinden.

Die praxisbezogene berufliche Weiterbildung sollte mit dem 2005 erstmals angebotenen Seminar „Aus der Praxis für die Praxis“ verstärkt werden. Zielgruppe des 2006 durchgeführten und 2007 angebotenen 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 Schulung von Produktionsmitarbeitern auf Basis der Lehrbriefe durchgeführt werden können.

Zum Thema Überwachung der Zementqualität werden jährlich vier Seminare angeboten. Zielgruppe dieser Seminare sind Laborleiter und verantwortliche Labormitarbeiter der Werke. Im eintägigen Seminar „Röntgenfluoreszenz (RFA)“ werden den Teilnehmern vertiefte Kenntnisse der RF-Analysentechnik vermittelt. Im zweitägigen 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. Insbesondere werden praktische Übungen durchgeführt und die technischen Grundlagen der Analysensysteme erörtert. Im zweitägigen 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 eintägigen Seminars war die Bestimmung des Hüttensandgehalts in Zementen nach dem kombinierten mikroskopisch-chemischen Verfahren. Dieses Seminar wurde ab 2005 durch ein eintägiges 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 in den Jahren 2005 und 2007 das zweitägige Seminar „Grundlagen der Betonbautechnik/Dauerhaftigkeit von Beton- und

Stahlbetonbauteilen“ angeboten. 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 aus Schwinden und Hydratationswärmeentwicklung 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 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 in den Jahren 2005 und 2006 vom Forschungsinstitut jeweils acht Seminare angeboten. Für 2007 sind wieder sieben Seminare vorgesehen.

## Veröffentlichungen

### Schriftenreihe der Zementindustrie

- Kordts, S.: *Herstellung und Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone.*  
Düsseldorf : Verl. Bau und Technik, 2005 (Schriftenreihe der Zementindustrie 66)
- Puntke, S.: *Auswirkungen des Phosphateintrages in Drehofenanlagen der Zementindustrie auf Klinkermineralogie und Zementeigenschaften.*  
Düsseldorf : Verl. Bau und Technik, 2005 (Schriftenreihe der Zementindustrie 67)
- Bodendiek, N.: *NO<sub>x</sub>-Minderung durch gestufte Verbrennung und deren Wechselwirkung mit dem SNCR-Verfahren bei Vorcalcineranlagen der Zementindustrie.*  
Düsseldorf : Verl. Bau und Technik, 2005 (Schriftenreihe der Zementindustrie 68)
- Schäfer, E.: *Einfluss der Reaktionen verschiedener Zementhauptbestandteile auf den Alkalihaushalt der Porenlösung des Zementsteins.*  
Düsseldorf : Verl. Bau und Technik, 2006 (Schriftenreihe der Zementindustrie 69)
- Seidler, T.: *Minderung rohmaterialbedingter SO<sub>2</sub>-Emissionen in der Zementindustrie.*  
Düsseldorf : Verl. Bau und Technik, 2006 (Schriftenreihe der Zementindustrie 70)
- Feldrappe, V.: *Zum Frostwiderstand gefügedichter Betone mit geringen Wasserzementwerten.*  
Düsseldorf : Verl. Bau und Technik, 2007 (Schriftenreihe der Zementindustrie 71)

### Sicherheits-Merkblätter

- Nr. 100 Ladungssicherung bei Zementsackware  
 Nr. 101 Tödlicher Unfall mit einem Gabelstapler in einer Packereihalle  
 Nr. 102 Tödlicher Unfall durch Absturz  
 Nr. 103 Schwere Verletzung nach Sprung von einer Rohrleitung  
 Nr. 104 Unfall am Palettierer  
 Nr. 105 Schwere Augenverletzung beim Ofenschießen

### **Sicherheits-Prüflisten**

- Nr. 80 Ladungssicherung bei Zementsackwaren
- Nr. 81 Innerbetrieblicher Fahrzeugverkehr
- Nr. 82 Arbeiten in Höhe mit PSA gegen Absturz
- Nr. 83 Bühnen und Podeste
- Nr. 84 Sicherheitsgerechtes Verhalten an Palettieren
- Nr. 85 Augenschutz

### **VDZ-Mitteilungen**

Nr. 127 (Mai 2005) – Nr. 132 (Dezember 2006)

Jedes Jahr werden drei Ausgaben mit Erscheinungstermin im Mai, September und Dezember publiziert.

### **Monitoring-Bericht**

*Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen : Monitoring-Bericht 2000-2003 ; Beitrag der deutschen Zementindustrie.*

Hrsg.: Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, 7., aktualisierte Aufl. Düsseldorf, 2005

### **Umweltdaten der deutschen Zementindustrie**

*Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2004.*

Hrsg.: Verein Deutscher Zementwerke, Düsseldorf, 2005

*Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2005.*

Hrsg.: Verein Deutscher Zementwerke, Düsseldorf, 2006

*Environmental Data of the Cement Industry 2005.*

Hrsg.: Verein Deutscher Zementwerke, Düsseldorf, 2006

## Einzelveröffentlichungen

- Bodendiek, N.; Hoenig, V.: *NO<sub>x</sub> abatement by staged combustion in the calciner – new findings.*  
In: Cement International 4 (2006) 1, S. 64-75
- Böhm, M.; Schäfer, E.; Baetzner, S.: *Einfluss der Alkalität der Porenlösung auf die Auslösung einer schädigenden AKR.*  
In: Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): 16. Internationale Baustofftagung, IBAUSIL, 20. - 23. September 2006, Weimar, Bundesrepublik Deutschland : Bd. 2. Weimar, 2006, S. 0435-0442
- Dijkstra, J.J.; Slood, H.A. van der; Spanka, G.; Thielen, G.: *How to judge release of dangerous substances from construction products to soil and groundwater.*  
Petten, 2005 (ECN-C 05-045)
- Feldrappe, V.; Müller, C.: *Ursachen der Frostschädigung silikastaubhaltiger hochfester Betone.*  
In: Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): 16. Internationale Baustofftagung, IBAUSIL, 20. - 23. September 2006, Weimar, Bundesrepublik Deutschland : Bd. 2. Weimar, 2006, S. 0743-0750
- Hauer, B.; Ramolla, S.; Rübner, K.: *Potenziale des Sekundärstoffeinsatzes im Betonbau.*  
In: Statusseminar zum Verbundforschungsvorhaben Nachhaltig Bauen mit Beton / Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, DAfStb; Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, BAM (Hrsg.). Berlin, 2006, S. 22-31
- Klein, H.; Hoenig, V.: *Model calculations of the fuel energy requirement for the clinker burning - process.*  
In: Cement International 4 (2006) 3, S. 44-63
- Kordts, S.; Breit, W.: *The flow cone for assessing the workability of SCC.*  
In: Shah, Surendra P. (Ed.): SCC 2005 : Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete ; Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete ; Vol. 2. Addison, Ill.: Hanley Wood, 2005, S. 751-756
- Lipus, K.: *Praxisnahe Sulfatwiderstandsprüfung.*  
In: Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): 16. Internationale Baustofftagung, IBAUSIL, 20. - 23. September 2006, Weimar, Bundesrepublik Deutschland : Bd. 2. Weimar, 2006, S. 0531-0538
- Lipus, K.; Thielen, G.: *Schadenspotential durch Thaumasitbildung.*  
In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, DAfStb (Hrsg.): Sulfatangriff auf Beton : Sachstandsbericht. Berlin: Beuth, 2006 (DAfStb: Schriftenreihe 554), S. 15-48
- Müller, C.: *Performance of Portland-composite cements.*  
In: Cement International 4 (2006) 2, S. 112-119
- Müller, C.; Lang, E.: *Dauerhaftigkeit von Beton mit Portlandkalkstein- und Portlandkompositementen CEM II-M (S-LL).*  
In: beton 55 (2005) 3, S. 131-138; 55 (2005) 4, S. 197-202; 55 (2005) 5, S. 266-269
- Ogniwek, D.; Rickert, J.: *Verbundforschung Sichtbeton.*  
In: Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005) 6, S. 503-506
- Rickert, J.; Thielen, G.: *Influence of a phosphonic-acid-based long-term retarder on the hydration of clinker and cement.*  
In: Cement International 4 (2006) 1, S. 102-108; 4 (2006) 2, S. 120-125
- Ruppert, J.; Maudera, M.; Thomas, C.; Lüers, J.: *Innovative gap-filling strategy for annual sums of CO<sub>2</sub> net ecosystem exchange.*  
In: Agricultural and Forest Meteorology 138 (2006) 1-4, S. 5-18

- Ruppert, J.; Thomas, C.; Foken, T.:  
*Scalar similarity for relaxed eddy accumulation methods.*  
In: *Boundary-Layer Meteorology* 120 (2006) 1, S. 39-63
- Schäfer, S.; Hoenig, V.:  
*NO<sub>x</sub> abatement in precalciner plants in the cement industry by a combination of staged combustion and SNCR technology.*  
In: *Cement International* 4 (2006) 5, S. 59-71
- Schneider, C.; Baetzner, S.:  
*Bestimmung des Hüttensandgehaltes von Zementen mittels Röntgenbeugung.*  
In: Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): 16. Internationale Baustofftagung, IBAUSIL, 20. - 23. September 2006, Weimar, Bundesrepublik Deutschland : Bd. 1. Weimar, 2006, S. 0075-0082
- Scheider, C.; Baetzner, S.:  
*X-ray diffractometric determination of the granulated blastfurnace slag content of cement.*  
In: *Cement International* 3 (2005) 6, S. 96-105
- Schneider, M.; Wassing, W.:  
*Special Agents.*  
In: *World Cement* 37 (2009) 9, S. 89-92
- Scur, P.; Hoppe, H.:  
*The present state of NO<sub>x</sub> abatement with the SNCR process.*  
In: *Cement International* 4 (2006) 2, S. 62-74
- Seemann, S.; Müller-Pfeiffer, M.; Schneider, M.:  
*Impact of grinding technologies on the performance of slag cement.*  
In: *Global Cement Magazine* (2007) 1, S. 12-18
- Siebel, Eberhard u.a.:  
*Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse.*  
1. Aufl. Berlin : Beuth, 2005 (DAfStb: Schriftenreihe 560)
- Siebel, E.; Böhm, M.; Borchers, I.;  
Bokern, J.; Müller, C.; Schäfer, E.:  
*AKR-Prüfverfahren.*  
In: Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): 16. Internationale Baustofftagung, IBAUSIL, 20. - 23. September 2006, Weimar, Bundesrepublik Deutschland : Bd. 2. Weimar, 2006, S. 0373-0388
- Siebel, E.; Böhm, M.; Borchers, I.;  
Müller, C.; Bokern, J.; Schäfer, E.:  
*AKR-Prüfverfahren – Vergleichbarkeit und Praxis-Relevanz.*  
In: *beton* 56 (2006) 12, S. 599-607 und 57 (2007) 1-2, S. 63-71
- Thielen, G.:  
*Verbundforschungsvorhaben Nachhaltig Bauen mit Beton.*  
In: Statusseminar zum Verbundforschungsvorhaben Nachhaltig Bauen mit Beton / Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, DAfStb; Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, BAM (Hrsg.). Berlin, 2006, S. 1-5
- Wassing, W.:  
*Effectiveness of chromate reducers for cement after thermal, chemical and mechanical stressing.*  
In: *Cement International* 4 (2006) 3, S. 70-86

**Tagungsberichte**

- Specialist conference „Cement Process Engineering“ of the German cement works association (VDZ).*  
In: *Cement International* 4 (2006) 2, S. 28-43
- Technisch-wissenschaftliche Zementtagung 2005.*  
Düsseldorf, 2005
- Zemente : Herstellung und Anwendung.*  
In: *beton* 55 (2005) 12, S. 622-624







Verein Deutscher Zementwerke e.V.  
Forschungsinstitut der Zementindustrie  
Postfach 30 10 63  
D-40410 Düsseldorf  
Tannenstraße 2  
D-40476 Düsseldorf