

Tätigkeitsbericht



2009 – 2012

Tätigkeitsbericht 2009–2012



VDZ gGmbH
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



Foto: Stefanie Grebe [Ausschnitt]

Inhalt

4	Verein Deutscher Zementwerke
	Forschungsinstitut der Zementindustrie
8	Der Verein Deutscher Zementwerke
8	Ausschüsse, Arbeitskreise und Kommissionen
13	Zusammenarbeit mit anderen Organisationen
15	Vermittlung der Erkenntnisse
16	Forschungsinstitut der Zementindustrie
18	Dienstleistungen
23	I Verfahrenstechnik der Zementherstellung
24	Anlagenbetrieb
31	Energieeffizienz
32	Energiebedarf
37	II Umweltschutz bei der Zementherstellung
38	Gesetzgebung
40	Klimaschutz
49	Umweltdaten
50	Minderung gas- und staubförmiger Emissionen
55	III Leistungsfähigkeit von Zement
56	Chemisch-mineralogische Zusammensetzung
57	Quantitative Phasenanalyse von Zementen
58	Einfluss von Roh- und Brennstoffen auf die Klinkereigenschaften
60	Sulfatoptimierung von Zementen
60	Beeinflussung der Wirksamkeit von Chromatreduzierern
62	Referenzmaterialien und Referenzzemente
62	Reaktivität von Zementhauptbestandteilen
66	Ternäre Zemente mit Flugasche und Hüttensand als Hauptbestandteil
68	Sulfatwiderstand bei Magnesiumexposition
69	Nanooptimierte Bindemittel mit hohem Säurewiderstand
71	Einfluss von Additiven auf Druckfestigkeit und Carbonatisierungsneigung von Hochofenzement
75	IV Güteüberwachung und Qualitätssicherung von Zement
76	Überwachungsgemeinschaft des VDZ
79	Qualitätssicherung
81	Normung
85	V Betonausgangsstoffe und -technologie, Betonbautechnik
86	Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen
91	Zement und Zusatzmittel
96	Alkali-Kieselsäure-Reaktion
105	Sulfatwiderstand
107	Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand
108	Frostwiderstand von Gesteinskörnungen im Beton
109	Besondere Anwendungen
114	Betonwaren
114	Estrich
115	Industriebetonböden
116	Verkehrswegebau
118	Regelwerke
125	Brandschutz
126	Gutachten
129	VI Umwelt und Gesundheit
130	Umweltkriterien für zementgebundene Baustoffe
132	Produktbezogener Arbeits- und Gesundheitsschutz
135	Europäische Bauproduktenrichtlinie/-verordnung
137	DIBt-Merkblatt: Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten
138	Zementgebundene Werkstoffe im Trinkwasserbereich
139	Nachhaltiges Bauen
141	Mess- und Prüfverfahren
143	VII Verantwortung für Mitarbeiter
144	Arbeitssicherheit
146	VDZ-Weiterbildungswerk
150	Veröffentlichungen

Verein Deutscher Zementwerke Forschungsinstitut der Zementindustrie

Liebe Leserinnen und Leser unseres Tätigkeitsberichts,

traditionell informiert der Verein Deutscher Zementwerke mit seinem Tätigkeitsbericht über die Arbeit des Forschungsinstituts der Zementindustrie. Auch für den zurückliegenden Berichtszeitraum der Jahre 2009 bis 2012 haben wir die wesentlichen Ergebnisse unserer Forschungsarbeit zusammengefasst. Sie sind das Resultat der Gemeinschaftsarbeit der deutschen Zementindustrie, die nunmehr seit 135 Jahren stattfindet und sich bis heute bewährt.

Zement ist nach wie vor der Baustoff, ohne den eine moderne Gesellschaft nicht auskommt. Die Prognose des weltweiten Zementbedarfs geht von einer weiteren Zunahme des Zementverbrauchs aus – nicht zuletzt deshalb, weil angesichts des Bevölkerungswachstums in vielen Ländern der Welt ein enormer Nachholbedarf an Infrastrukturmaßnahmen besteht.

In Anbetracht dieser Entwicklung sowie der weltweiten Verfügbarkeit der Ausgangsstoffe für die Zementherstellung, insbesondere Kalkstein und Ton, gibt es auch heute keinen anderen Baustoff, der Zement und Beton angemessen ersetzen könnte. Das gilt insbesondere auch deshalb, weil mit Zement hergestellte Betone in ihren Anwendungen äußerst robust und langlebig sind.

Gleichwohl steht die Zementindustrie vor großen Herausforderungen. Angesichts des großen Bedarfs an zementgebundenen Baustoffen gilt es, den Energiebedarf und den Ressourceneinsatz, aber auch die damit verbundenen CO₂-Emissionen weiter zu optimieren. Da kurzfristig kein Bindemittel verfügbar ist, das auch nur annähernd hinsichtlich Art und Menge die bisherigen bewährten Zemente ersetzen kann, gilt es, die heutigen auf Portlandzementklinker basierenden Systeme weiter zu verbessern.

Vor diesem Hintergrund fasst der vorliegende Tätigkeitsbericht die Arbeit des Forschungsinstituts der Zementindustrie auf dem Gebiet der Zementherstellung und -anwendung zusammen. Die Schwerpunkte der Forschung bilden wie auch in den vorhergehenden Jahren die Verfahrenstechnik und der Umweltschutz bei der Herstellung sowie auch – im Hinblick auf die Anwendung – die Leistungsfähigkeit von Zement in Mörtel und Beton. In allen Bereichen kommen dabei dem Arbeits- und Gesundheitsschutz, der Qualitätssicherung sowie der Arbeitssicherheit eine große Bedeutung zu.

Die Forschungstätigkeit des VDZ stützt sich nicht nur auf die Gemeinschaftsarbeit und den Erfahrungsaustausch mit seinen Mitgliedern. Auch die Erkenntnisse aus dem umfangreichen Dienstleistungsangebot des VDZ geben ihr immer wieder neue Impulse. Eingebunden in internationale Forschungsprojekte, insbesondere als Gründungsmitglied der European Cement Research Academy, wird der VDZ mit seinem Forschungsinstitut auch zukünftig zu einer wettbewerbsfähigen sowie umwelt- und ressourcenschonenden Zementherstellung beitragen können.

Ihnen als Leserinnen und Lesern wünsche ich im Namen des VDZ eine anregende Lektüre.

Dr. Martin Schneider
Hauptgeschäftsführer

Verein Deutscher Zementwerke
Düsseldorf, im September 2012



Das Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf

Baupolitik,
Energiepolitik,
Öffentlichkeits-
arbeit, Statistik

Verein Deutscher Zementwerke e.V.

Forschungsinstitut der Zementindustrie

Verwaltung,
Controlling,
Buchhaltung, IT,
Kommunikation

VDZ gGmbH

Beton-
technik

Umwelt &
Betriebs-
technik

Zement-
chemie

Forschungsinstitut der Zementindustrie GmbH

Umwelt-
messtechnik

Qualitäts-
sicherung
& Analytik

FIZ-Zert Zertifizierungsstelle für
Managementsysteme

Ausschüsse

Ausschuss
Betontechnik

Energie-
ausschuss

Ausschuss
Umwelt und
Verfahrenstechnik

Ausschuss
Zementchemie

Fachausschuss
der
Überwachungs-
gemeinschaft

Kommissionen

Kommission
Emissions-
handel

Kommission
Alkali-
Kieselsäure-
Reaktion

Kommission
Transportbeton

Lenkungsgremien

Technisch-
wissenschaftlicher
Beirat

Haushalts-
gremium

Zertifizierungs-
beirat

Vorstand

Präsident

G. Hirth, Ulm

Vizepräsidenten

W. Bauer, Wiesbaden

C. Knell, Heidelberg (ab 19.04.2012)

Dr.-Ing. G. Krogbeumker, Beckum

U. Aumüller, Karsdorf

K. Bauer, Ulm

Dr.-Ing. K. Bock, Harburg (bis 19.04.2012)

M. von der Brelje, Hamburg (ab 30.09.2009)

Dr.-Ing. H. A. Brodersen, Dortmund (bis 11.03.2010)

K. Brüggem, Karsdorf (ab 01.09.2010)

Dr. M. Bucker, Solnhofen

M. Edelmann, Rohrdorf

B. Goedecke, Wiesbaden

U. Kern, Dotternhausen (ab 01.01.2012)

Dr.-Ing. G. Kirchner, Oberursel

R. Körner, Wiesbaden

M. Krogbeumker, Beckum (ab 19.04.2012)

M. Langvad, Düsseldorf (ab 11.03.2010)

P. Laubenstein, Ulm

P. Linten, Ennigerloh (bis 19.04.2012)

W. Matthias, Erwitte

L. Mittelholzer, Hamburg

W. Müller, Großenlütder

R. Nobis, Leimen (bis 04.11.2009)

J. S. Pfitzner, Oberursel (bis 01.09.2010)

M. Graf Pückler-Märker, Harburg (ab 19.04.2012)

J. Ramcke, Üxheim-Ahütte

A. Rotermund, Rüdersdorf

A. Rupp, Heidelberg (ab 19.04.2012)

E. Schleicher, Ulm

V. Schneider, Leimen

H. Seibel, Erwitte

G. Seitz, Heidelberg (bis 27.09.2011)

Dr. D. Spenner, Erwitte

K. Tausendpfund, Pommelsbrunn

E. Thomas, Dornburg (ab 01.01.2012)

R. Willmann, Dotternhausen (bis 31.12.2011)

E. Wittmann, Düsseldorf

O. Zimmermann, Hamburg (bis 30.09.2009)

Hauptgeschäftsführer des VDZ und Leiter des Forschungsinstituts

Dr. M. Schneider

VDZ gGmbH

Geschäftsführer

Dr.-Ing. V. Hoenig

Dr.-Ing. C. Müller

Forschungsinstitut der Zementindustrie GmbH

Geschäftsführer

Dr.-Ing. M. Oerter

Technisch-Wissenschaftlicher Beirat

Vorsitzender

V. Schneider, Leimen

Obleute der Ausschüsse und Kommissionen

E. Bohlmann, Leimen (Betontechnik)

Dr. W. Dienemann, Leimen (Zementchemie)

M. Gieding, Heidelberg (Kommission Transportbeton)

B. Goedecke, Wiesbaden (Umwelt+Verfahrenstechnik)

G. Hirth, Ulm (Kommission Emissionshandel)

Dr. S. Lorenz, Wiesbaden (Energie)

P. Lyhs, Düsseldorf (Kommission Alkali-Kieselsäure-Reaktion)

Dr. H. Möller, Ulm (Fachausschuss Überwachungsgemeinschaft)

VDZ und sein Forschungsinstitut

Dr. M. Schneider

Haushaltsbeirat und Rechnungsprüfer

K. Brüggem, Oberursel

Dr.-Ing. S. Fink, Wiesbaden (Vorsitzender)

G. Geiß, Harburg

G. Hirth, Ulm

V. Janke, Ratingen

R. Keller, Ulm (RP)

S. Laube, Wiesbaden (RP, bis 19.04.2012)

F. Schramm, Heidelberg (seit 19.04.2012)

A. Spönnagel, Ulm

N. Zöllkau, Wiesbaden (RP, ab 19.04.2012)

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 Namen Verein Deutscher Zementwerke e. V. Im Januar 2012 wurde der gemeinnützige Teil der technisch-wissenschaftlichen Arbeit in die VDZ gGmbH überführt, deren alleiniger Gesellschafter der Verein Deutscher Zementwerke e. V. ist.

Mit seinem Forschungsinstitut fördert der VDZ die Entwicklung auf dem Gebiet der Herstellung und Anwendung hydraulischer Bindemittel. Die Gemeinschaftsaufgaben umfassen insbesondere die Förderung von Maßnahmen für die Qualitätssicherung, den Umweltschutz und die Arbeitssicherheit. Dem Transfer der wissenschaftlichen oder aus der betrieblichen Praxis gewonnenen Erkenntnisse dienen Veröffentlichungen, Kolloquien, Seminare, Tagungen und Kongresse. Des Weiteren fördert der VDZ die Aus- und Weiterbildung junger Führungskräfte. Zur Verwirklichung dieser Ziele verwaltet der VDZ seit Juni 1995 die nicht rechtsfähige Wissenschaftsstiftung der deutschen Zementindustrie, die Gerd-Wischers-Stiftung. Die Schulung und Weiterbildung von Mitarbeitern der Mitgliedsunternehmen dient dem gleichen Ziel.

Mitgliedschaft im VDZ

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

Die frühere baden-württembergische Umweltministerin Tanja Gönner und VDZ-Hauptgeschäftsführer Dr. Martin Schneider während der Jahrestagung Zement 2011 in Düsseldorf



Dem VDZ gehören zurzeit 25 deutsche Zementunternehmen mit 50 Zementwerken als ordentliche Mitglieder sowie 25 ausländische Zementunternehmen als außerordentliche Mitglieder an.

Ausschüsse, Arbeitskreise und Kommissionen ■

Ausschuss Betontechnik

Arbeitskreise: Verkehrsbau, Zement und Zusatzmittel; Ad-hoc-Arbeitskreise und Arbeitsgruppen: Europäische Normung, 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 und qualitätsbewussten Anwendung von Zement und Beton in der Praxis.

Unter Federführung des Arbeitskreises Verkehrsbau wurde der Sachstandsbericht „Dünne Asphaltbeläge auf Betondecken (DAB)“ erstellt und veröffentlicht. Um die Wirksamkeit lärmindernder Maßnahmen zu überprüfen, wurden in der Praxis verschiedene Betonbauweisen erprobt und messtechnisch begleitet. Neben Erfahrungen mit Dränbeton-Versuchsflächen wurden im Arbeitskreis auch die Erfahrungen mit dem Grinding-Verfahren, bei dem Längsrillen in vorhandene Verkehrsflächen eingefräst werden, sowie die Erfahrungen mit der Waschbetonbauweise zusammengestellt. Das Grinding-Verfahren stellt hierbei eine Maßnahme dar, Lärmemissionen im Vergleich zur Waschbetonbauweise um bis zu rd. 3 dB(A) zu mindern.

Der Arbeitskreis Zement und Zusatzmittel arbeitet im Auftrag des Ausschusses im Koordinierungsausschuss VDZ/Deutsche Bauchemie (DBC) eng mit Vertretern der Deutschen Bauchemie zusammen. Die Projektgruppe Schnittstellenfragen innerhalb des Koordinierungsausschusses erarbeitete Merksätze zu den Wechselwirkungen zwischen Zement und Zusatzmitteln. Die Zielstellung, mithilfe dieser Merksätze den Sachstand darzustellen und die Kommunikation zwischen der Zementindustrie und der Betonzusatzmittelindustrie zu verbessern, wurde damit erreicht. Darüber hinaus wurden durch den Arbeitskreis die Untersuchungen des Gefahrstoff-Informationssystems der Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (GISBAU) an staubarmen/staubfreien Produkten verfolgt und diskutiert.

In dem Bestreben, die normativen Einsatzmöglichkeiten von CEM II/B-M Zementen mit bis zu 20 M.-% Kalkstein zu erweitern, erarbeitete die Ad-hoc-Arbeitsgruppe Europäische Normung einen Vorschlag zur Ergänzung der DIN 1045-2. Da die Zementnorm DIN EN 197-1 keine Klasse/Begrenzung des Kalksteingehalts vorsieht, wurde erwogen, hierzu eine Regelung in der Normenreihe DIN 1164 zu treffen. Im Verlauf der Diskussion im Normenausschuss Zement legte das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) eine Auswertung von Ergebnissen der Dauerhaftigkeitsuntersuchungen in Zulassungsverfahren vor. Auf der Grundlage dieser Auswertung wäre die Bildung einer Klasse von CEM II/B-M-Zementen mit einem Mindestklinkergehalt von 70 M.-% und einem maximalen Kalksteingehalt von 15 M.-% bezogen auf die Summe der Hauptbestandteile möglich. Diese Zemente könnten dann in der Betonnorm für die An-

wendung in Beton für alle Expositionsklassen zugelassen werden.

Ein Schwerpunkt des Ausschusses Betontechnik im Berichtszeitraum bildete die Überarbeitung der europäischen Betonnorm EN 206. Mitglieder des Arbeitsausschusses wirken in verschiedenen CEN-Arbeitsgruppen (z. B. CEN / TC 104/SC 1/TG 5) sowie den übergeordneten Gremien CEN/TC 104 und CEN/TC 104/SC 1 aktiv an der Verbesserung des Normentwurfs mit. Da sich bei diesen und anderen Themen Fragestellungen aus der Regelwerksetzung und der Dauerhaftigkeit des Betons ergänzen, wird die Ad-hoc-Arbeitsgruppe Europäische Normung ihre Aufgaben zukünftig als Arbeitskreis Regelwerke und Dauerhaftigkeit wahrnehmen.

Die Ad-hoc-Arbeitsgruppe Alkali-Kieselsäure-Reaktion wurde aufgelöst. Ihre Aufgaben werden nun von der Kommission Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) wahrgenommen. In enger Zusammenarbeit mit der Kommission AKR hat der Ausschuss die Überarbeitung der Alkali-Richtlinie des DAfStb begleitet. Der Arbeitsausschuss und die Kommission betreuen darüber hinaus die Forschungsprojekte zu einer möglichen Alkaliempfindlichkeitsklasse E-II-S und zur Bewertung des AKR-Schädigungspotenzials von Betonen der Feuchtigkeitsklassen WF und WA in so genannten Performance-Prüfungen.

Ein weiteres Schwerpunktthema im Berichtszeitraum war die Analyse der Ergebnisse des DAfStb-Sonderforschungsvorhabens „Vertiefte Untersuchungen zum Sulfatwiderstand von Beton“ (drei Arbeitspakete – Verbundforschung). Die Forschungsarbeiten konnten im Jahr 2011 weitgehend abgeschlossen werden. Die Ergebnisse werden in der Schriftenreihe des DAfStb veröffentlicht. In den Untersuchungen wurde u. a. festgestellt, dass bei Zement-Flugasche-Gemischen mit 20 M.-% Flugasche, bezogen auf (z+f), geringe Magnesiumkonzentrationen in sulfathaltigen Wässern und Böden den Schädigungsverlauf bei Laborprüfungen und Auslagerungsuntersuchungen bei dauerhaft niedrigen Temperaturen beschleunigen. Die den Schadensprozess beschleunigenden Effekte wurden bereits bei deutlich geringeren Magnesiumkonzentrationen festgestellt, als sie in DIN 1045-2 klassifiziert sind. Die Kombination aus Sulfatangriff, niedrigen Magnesiumkonzentrationen und niedriger Temperatur wird im Hinblick auf eine Klassifizierung derzeit nicht erfasst. Durch Einführung einer neuen Klassifizierungssystematik würde sich

die Anwendung der Betonnorm verkomplizieren. Zudem können Klassengrenzen aus den vorliegenden Untersuchungen nicht abgeleitet werden. Als vorbeugende Maßnahme ist daher eine Erhöhung des derzeit vorgeschriebenen Mindestflugaschegehalts von 20 auf 30 M.-% bei Anwendung von DIN 1045-2:2008-08, Abschnitt 5.2.5.2.2, 7. Absatz, dritter Spiegelstrich vorzunehmen. Alle Untersuchungen (Labor- und Auslagerungsversuche) haben gezeigt, dass eine Steigerung des Flugaschegehalts im Gemisch aus Zement und Flugasche um diesen Anteil den Sulfatwiderstand von Betonen, die die HS-Eigenschaft bis 1 500 mg Sulfat/l durch Zugabe von Flugasche erreichen, nachweislich verbessert. Diese Regelung gilt als Vorsichtsmaßnahme bei Sulfatangriff, und zwar unabhängig davon, ob geringe Mengen Magnesium vorhanden sind oder nicht. Der Vorteil dieser Regelung besteht darin, dass sie zum einen einfach zu handhaben ist und andererseits zusätzliche Festlegungen für neue Einwirkungsklassen mit (derzeit unbekannten) Grenzwerten im Bereich niedriger Magnesiumkonzentrationen in DIN EN 206-1 entbehrlich sind. Diese Regelung wird Eingang in die Neuausgabe der DIN 1045-2 im Zusammenhang mit der Revision von EN 206 finden (Quelle: DAfStb).

Der Ausschuss beschäftigt sich weiterhin mit der Kommunikation von Umweltdaten von Zement und Beton in Umweltproduktdeklarationen (EPD). Im Berichtszeitraum wurde eine EPD auf Basis eines generischen Zements, charakteristisch für den Inlandversand in Deutschland, erstellt. Die Veröffentlichung der Umweltproduktdeklaration erfolgte im ersten Quartal 2012. Diese Verbands-EPD kann in weiteren Berechnungen zur ökobilanziellen Betrachtung von Bauteilen oder Bauwerken herangezogen werden. Aufbauend auf der EPD eines deutschen Durchschnittszements sollen auch Umweltproduktdeklarationen für Konstruktionsbetone verschiedener Festigkeitsklassen erarbeitet werden. Der VDZ hat hierzu die notwendigen Abstimmungsgespräche mit dem Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e. V. und der Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilbau e. V. geführt.

Ein weiteres Projekt widmete sich Untersuchungen zu den Auswirkungen der erweiterten europäischen Basisanforderungen der Bauproduktenverordnung auf harmonisierte Bauproduktenormen. Diese Auswirkungen wurden in einem Forschungsvorhaben unter Federführung des VDZ im Auftrag des Bundesinstituts für

Bau-, Stadt- und Raumforschung untersucht.

Ausschuss Umwelt und Verfahrenstechnik

Arbeitskreise: Arbeitssicherheit, Feuerfeste Materialien (bis 2009), Monolithische feuerfeste Zustellungen (ab 2010), NO_x-Minderung, Drehofenbrenner; **Lehrgangsbeirat;** **Ad-hoc-Arbeitsgruppe:** Alternative Roh- und Brennstoffe

Neben den aktuellen Fragen der thermischen und mechanischen Verfahrenstechnik befasste sich der Ausschuss schwerpunktmäßig mit sicherheitsrelevanten, umwelttechnischen und energetischen Themen. Im Vordergrund standen dabei Themen wie die Verbesserung der Arbeitssicherheit, die NO_x-Minderung mittels SCR-Verfahren, die Auswirkungen des Emissionshandels, mögliche Abwärmenutzungskonzepte sowie die weitere Optimierung des alternativen Roh- und Brennstoffeinsatzes. Darüber hinaus wurden die Forschungsarbeiten des Instituts zur CO₂-Abtrennung aus dem Klinkerbrennprozess, zur Minderung von Korrosionsschäden, zur Brennoptimierung sowie zur Optimierung der Gattierung von Kugelmöhlen intensiv begleitet und die entsprechenden Untersuchungen in den großtechnischen Anlagen ausgewertet.

Anlässlich der 100. Sitzung des Arbeitskreises im Frühjahr 2011 blickt er nunmehr auf über 50 Jahre erfolgreiche Sicherheitsarbeit des Vereins Deutscher Zementwerke und seiner Mitgliedsunternehmen zurück. Schwerpunkte der Arbeitskreistätigkeit waren die Ausarbeitung von Sicherheitsdatenblättern, die Betriebssicherheitsverordnung, die europäische Maschinenrichtlinie sowie weitere Auflagen zum Schutz des Menschen am Arbeitsplatz. Für die Unterstützung der Werke wurde ein Leitfaden zur Prüfung nach BetrSichV sowie eine Handlungsempfehlung zur Umsetzung der europäischen Maschinenrichtlinie erstellt und veröffentlicht.

Darüber hinaus wurde das Merkblatt „Sicheres Arbeiten beim Umgang mit Heißmehl“ vollständig überarbeitet und den Mitgliedsunternehmen zur Verfügung gestellt.

Mit der Veröffentlichung des Verfahrenstechnischen Merkblatts Vt 16 „Feuerfeste Materialien“ Ende 2009 hat der Arbeitskreis ein Dokument vorgelegt, das auf die speziellen Bedürfnisse des Praktikers im Zementwerk zugeschnitten ist und alle nö-

tigen Informationen bezüglich feuerfester Zustellungen geformter Erzeugnisse beinhaltet. Der Fokus des Merkblatts wurde auf die Zustellung im Drehrohrofen gelegt. Es enthält folgende Themen:

- Eingangskontrolle der Steine
- Techniken der Zustandsdiagnose (feuerfester Materialien)
- Zustellmethoden
- Trocknungs- und Aufheizprozeduren
- Einfluss der Einsatzbedingungen auf den Feuerfestverbrauch
- Schäden an Feuerfestmaterialien in Zementanlagen
- Vermessung und Einstellung des Drehofens
- Arbeitssicherheit bei Feuerfestarbeiten

Bei der Erstellung des Merkblatts ist neben den praktischen Erfahrungen der Arbeitskreismitglieder auch das Wissen der Zuliefererindustrie mit eingeflossen.

Nach der erfolgreichen Veröffentlichung des Merkblatts Vt 16 hat der Arbeitskreis die Aufgabe übernommen, das Verfahrenstechnische Merkblatt Vt 11 „Monolithische feuerfeste Zustellungen in Zementwerken“ aus dem Jahr 1994 zu aktualisieren, da viele Aspekte des Merkblatts nicht mehr der heutigen Praxis entsprechen. Das aktualisierte Merkblatt wird folgende Themen beinhalten:

- Massen für die Zementindustrie
- Anwendungsbereiche monolithischer Massen
- Konstruktion der monolithischen Zustellungen
- Zustellmethoden und Verarbeitung monolithischer Massen
- Trocknungs- und Aufheizprozeduren
- Schäden monolithischer Zustellungen

Der Arbeitskreis NO_x-Minderung hat sich im Berichtszeitraum vornehmlich mit den beiden SCR-Demonstrationsprojekten (SCR = Selective Catalytic Reduction) im Zementwerk Mergelstetten (High-Dust-Verfahren) und im Zementwerk Rohrdorf (Low-Dust-/Tail-End-Verfahren) beschäftigt. Darüber hinaus werden alle internationalen Entwicklungen in Zusammenhang mit der SCR-Technologie verfolgt. Ein weiteres Demonstrationsprojekt, das im Zementwerk Mannersdorf/Österreich anläuft, wird durch den Arbeitskreis begleitet.

Neben den technischen Fragen zur NO_x-Minderung sind auch die umweltrechtlichen Anforderungen ein wichtiges Thema im Arbeitskreis. Intensiv wurden die Umsetzung der IED-Richtlinie und die be-

vorstehende Novellierung der 17. BImSchV diskutiert.

Die deutschen Anlagenbetreiber verfügen mittlerweile über langjährige Betriebserfahrungen bei hohen Einsatzmengen von festen alternativen Brennstoffen, jedoch sind Erkenntnisse über eine optimale Betriebsweise der Drehofenfeuerung bei einem hohen Brennstoffeinsatz nicht eindeutig oder allgemein abgesichert. Der Arbeitskreis Drehofenbrenner hat daher mit acht Brennerherstellern ein „optimales“ Brennerdesign und einen „optimalen“ Brennerbetrieb diskutiert. Moderne Drehofenbrenner sind durch eine Vielzahl an Lanzen, Rohren und Ringkanälen charakterisiert, die flexibel die Verbrennung von grobstückigen und gemahlenen, flüssigen und viskosen sowie gasförmigen Brennstoffen ermöglichen. Individuell auf den Brennstoff abgestimmte Verwirbelungssysteme mischen die Brennstoffe gezielt in die Flamme ein. Erste Erfahrungen mit einem Sauerstoffeinsatz im Klinkerbrennprozess wurden ebenfalls mit Anlagenbetreibern ausgetauscht. Im Gespräch mit Verbrennungsexperten aus der Forschung und der Praxis wurde auch der Wissensstand über Verbrennungsvorgänge in Drehofenflammen bei Mitverbrennung von alternativen Brennstoffen erweitert. Die Ergebnisse der Arbeitskreistätigkeit wurden in einem Merkblatt zusammengefasst. Die Schwerpunkte des Merkblatts liegen auf den Themen Drehofenbrenner, alternative Brennstoffe und Drehofenfeuerung. Weitere Themen sind elektrische Ausrüstung, Verschleiß, Ofenbetrieb und Klinkerqualität sowie Emissionen.

In den Jahren 2009 und 2010 hat der Lehrgangsbeirat vornehmlich die Entwicklung und Implementierung der VDZ-Lernplattform (www.vdz-elearning.de) in das betriebliche Weiterbildungswesen begleitet. Die Plattform wird seit dem 01.01.2010 von vielen Mitgliedswerken erfolgreich zur werksinternen Weiterbildung genutzt. Seit 2011 steht nunmehr die Weiterentwicklung der VDZ-Lernplattform um die Wissensbereiche Kalk und Beton sowie durch die Integration eines Nachschlagewerks und einer Kommunikationsplattform im Vordergrund der Arbeiten. Ziel des Projekts ist es, den Umgang mit Wissen in der Steine- und Erden-Industrie zu untersuchen und durch Web 2.0-Technologien zu optimieren.

Im Oktober 2010 wurde eine Ad-hoc-Arbeitsgruppe eingesetzt, die das Schrifttum der deutschen Zementindustrie zum Einsatz alternativer Brenn- und Rohstoffe

überarbeiten und aktualisieren soll. Hintergrund hierzu ist zum einen die Tatsache, dass der Energie- und Ressourceneffizienz immer größere Bedeutung beigemessen wird. Zum anderen ist die VDZ-Broschüre „Hart–Stark–Fair“ mehr als zehn Jahre alt und daher nicht mehr aktuell. Folgende Themenfelder werden in der Arbeitsgruppe bearbeitet:

- Energieeffizienz: Die besonderen Aspekte des Einsatzes alternativer Brennstoffe und ihrer Auswirkung auf die Energieeffizienz von Zementdrehofenanlagen wird betrachtet. Dies ist auch im Zusammenhang mit dem CO₂-Emissionshandel zu sehen.
- Abfallpolitik: Die Fragen der abfallpolitischen Bewertung der industriellen Mitverbrennung wurden durch die Europäische Kommission neu aufgeworfen. Es ist davon auszugehen, dass die Verfügbarkeit alternativer Brenn- und Rohstoffe in entsprechender Qualität in Zukunft deutlich zurückgehen wird. Hierfür ist hauptsächlich die Konkurrenz mit den Müllverbrennungsanlagen von Bedeutung, die inzwischen zum großen Teil als Verwertungsanlagen eingestuft werden. Damit konkurrieren diese mit der Zementindustrie um die gleichen Einsatzstoffe auf dem Alternativbrennstoffmarkt.
- Umwelt/Emissionen: Die Auswirkungen des Einsatzes alternativer Brennstoffe auf die Emissionen der Zementdrehofenanlagen ist immer wieder Gegenstand der Diskussion, insbesondere im Vergleich zu Müllverbrennungsanlagen. Weiterhin stellt der biogene Gehalt der eingesetzten Alternativbrennstoffe für viele Zementwerke eine wichtige Entlastung beim CO₂-Emissionshandel dar.
- Produktqualität/Umweltverträglichkeit: Obwohl die Umweltverträglichkeit des Einsatzes alternativer Brennstoffe sowie die unverändert hohe Produktqualität wissenschaftlich vielfach nachgewiesen wurde, gibt es immer wieder Diskussionen, die diese in Frage stellen. Deshalb sollen die entsprechenden Argumente aktualisiert zusammengestellt werden.
- Ressourceneffizienz: Gerade im Hinblick auf Ressourceneffizienz kann die Zementindustrie auf eine Erfolgsgeschichte verweisen, die sich aus den hohen Einsatzraten alternativer Brenn- und Rohstoffe sowie Zementhauptbestand-

teile ergibt. Andererseits ist die Zementindustrie auf die heimischen Rohstoffe – wie vor allem Kalkstein, Mergel und Ton – angewiesen, ohne die sie in Deutschland nicht existieren kann.

Die wesentlichen Ergebnisse der Arbeitsgruppe werden in einer Präsentation sowie einer Broschüre zusammengefasst. Nach Fertigstellung erhalten diese alle Mitgliedsunternehmen.

Ausschuss Zementchemie

Arbeitskreise: Analytische Chemie, Leistungsfähigkeit von Zementbestandteilen

Die Arbeiten des Ausschusses umfassten im Berichtszeitraum schwerpunktmäßig aktuelle analytische Fragestellungen, den produktbezogenen Arbeits- und Gesundheitsschutz sowie laufende Forschungsprojekte des Forschungsinstituts. Forschungsaktivitäten, insbesondere zum Einsatz von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen und Zementen mit geringem Klinkeranteil wurden zusammen mit dem Arbeitskreis Leistungsfähigkeit von Zementbestandteilen betreut. Themen wie Rietveld- und Spurenanalytik sowie isotherme Wärmeflusskalorimetrie wurden gemeinsam mit dem Arbeitskreis Analytische Chemie bearbeitet. Zusammen mit der Arbeitsgruppe REACH wurden Themen wie die Einstufung und Kennzeichnung nach CLP-Verordnung, neue Sicherheitsdatenblätter für Klinker, Ofenstaub und Zement, Quarzfeinstaub, staubarme Zemente und zementäre Zubereitungen sowie zur REACH-Verordnung bearbeitet. Des Weiteren wurden Themen zur Betondauerhaftigkeit – wie die Alkali-Kieselsäure-Reaktion und der Sulfatwiderstand von Zementen – beraten sowie die Aktivitäten beim internationalen Forschungskonsortium NANOCER gespiegelt, dem der VDZ angehört. Viele der Themen wurden in zwei Vollsitzungen des Ausschusses einer breiten Fachöffentlichkeit vorgestellt und diskutiert. Sie fanden am 01.04.2009 und am 05.04.2011 in Düsseldorf statt und wurden von jeweils mehr als 200 Teilnehmern besucht.

Im Fokus des Arbeitskreises Analytische Chemie standen nach wie vor die Analytik von Sekundärbrennstoffen, die Auswahl und Eignungsprüfung verschiedener Referenzmaterialien, insbesondere für die Spurenanalytik und die Bestimmung des wasserlöslichen Chromats in Zementen, sowie Untersuchungen zur Lagerstabilität von chromatreduzierten Zementen. Es zeigte sich, dass die bisher geprüften Fluff- und PVC-Proben zwecks mangelnder Homo-

genität nicht als Referenzmaterialien in Betracht kommen. Die Ad-hoc-Arbeitsgruppe Spurenanalyse beschäftigte sich im Berichtszeitraum intensiv mit der Entwicklung eines interaktiven Expertensystems zur Methodik der Spurenanalyse auf Basis eines „Wikis“. Dieses soll nach Fertigstellung Laborchemikern eine praxisnahe und zugleich aktuelle Arbeitshilfe bieten.

Im Arbeitskreis Leistungsfähigkeit von Zementbestandteilen wurden im Wesentlichen die Ergebnisse laufender AiF-Forschungsprojekte diskutiert. Hierzu gehörten die Forschungsthemen: Einfluss der Brenn- und Kühlbedingungen auf Portlandzementklinker, Gemeinsame Nutzung von Hüttensand, Steinkohlenflugasche und Portlandzementklinker zur Herstellung optimierter Zemente und Betone, Verbesserung der Leistungsfähigkeit flugaschehaltiger Bindemittel, Nutzung von natürlichen getemperten Tonen als Zementhauptbestandteil sowie Wechselwirkungen zwischen Fließmitteln und den Zementhauptbestandteilen Klinker, Kalkstein und Hüttensand (siehe Kapitel III und V).

Die Arbeitsgruppe REACH beschäftigte sich in der Berichtsphase vorrangig mit den Erfordernissen, die sich aus den beiden neuen Europäischen Verordnungen zum Chemikalienrecht, der REACH- und der CLP-Verordnung, ergeben haben. So mussten bei der neuen europäischen Chemikalienbehörde (ECHA) Stäube aus der Zementklinkerherstellung, Flue Dust genannt, bis 01.12.2010 registriert werden. Portlandzementklinker musste bis zum 03.01.2011 notifiziert werden. Dies bedeutet, alle Zementklinkerproduzenten hatten eine Meldung in das Einstufungs- und Kennzeichnungsverzeichnis der ECHA vorzunehmen. Auf Basis der neuen Verordnungen wurden neue Muster-Sicherheitsdatenblätter für Portlandzementklinker, Flue dust und Zement erstellt.

Im ersten Halbjahr 2010 wurde die zweite Berichtsphase zum europäischen Sozial-Übereinkommen „kristalline Kieselsäure“ abgeschlossen. Die Zementindustrie hatte sich auch diesmal mit nahezu 100 % ihrer Standorte wieder deutlich stärker beteiligt als die meisten anderen Branchen. In den Werken hat das Thema Vermeidung von Staub, insbesondere von Quarzfeinstaub, einen hohen Stellenwert (siehe Kapitel VI).

VDZ-Kommission

Alkali-Kieselsäure-Reaktion

In enger Abstimmung mit dem Ausschuss Betontechnik begleitete die Kommission

im Berichtszeitraum die Überarbeitung der Alkali-Richtlinie und die Erstellung des Konzepts der WS-Grund- und Bestätigungsprüfung. Ziel aller Aktivitäten ist die Vermeidung von Schäden an Betonbauwerken infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR).

An bestehenden Betonfahrbahndecken, die vor Inkrafttreten des Allgemeinen Rundschreibens Straßenbau Nr. 15/2005 gebaut wurden, traten im Berichtszeitraum Schäden auf. Die Berichterstattung über diese und vermeintlich weitere Fälle unter dem Titel „Betonkrebs“ führte zur weiteren Verunsicherung im Umgang mit den Risiken einer schädigenden AKR. Die Kommission erarbeitete deshalb unter der Führung des VDZ zusammen mit den Verbänden BDB, BTB und MIRO eine Informationsbroschüre „Erfahrungen aus der Praxis und aktuelle Regelwerke“. Die Broschüre richtet sich gleichermaßen an Journalisten, Bauherren, Bauausführende und Baubehörden und soll einen Überblick und Orientierung zum Thema AKR geben.

Die Bereiche Straßenbau (ZTV Beton-StB) und Konstruktiver Ingenieurbau (z. B. ZTV-ING) wurden mit der 1. Berichtigung zur Alkali-Richtlinie in 2010 regelungstechnisch voneinander getrennt. Die Maßnahmen für Betonfahrbahndecken der Feuchtigkeitsklasse WS (Bauklassen SV und I bis III gemäß RStO) werden durch die TL Beton-StB und durch Allgemeine Rundschreiben Straßenbau festgelegt. Die Kommission begleitete den Entwurf der WS-Grund- und Bestätigungsprüfung und beriet diesen im Kontaktarbeitskreis MIRO/VDZ mit der Gesteinskörnungsindustrie. Mit der WS-Grund- und Bestätigungsprüfung werden Anforderungen an Gesteinskörnungen für Beton der Feuchtigkeitsklasse WS festgelegt. Die Einführung über ein Allgemeines Rundschreiben Straßenbau wird erwartet.

Ferner dokumentierte die Kommission im Kontaktarbeitskreis MIRO/VDZ die Entwicklungen in den letzten Jahren auf dem Gebiet der AKR. Sie stellte fest, dass wesentliche Aspekte, die vor zehn Jahren diskutiert wurden, unter Mitwirkung des VDZ und der Mitgliedsunternehmen umgesetzt wurden (z. B. Erweiterung NA-Zemente nach DIN 1164).

Die Kommission begleitet die IGF-Vorhaben zur Festlegung einer neuen Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S und der Prüfung des AKR-Schädigungspotenzials von Betonen der Feuchtigkeitsklassen WF und WA. Wenn eine neue Alkaliempfindlich-

keitsklasse E II-S definiert werden kann, werden hierzu entsprechende betontechnische Maßnahmen notwendig. Weitere IGF-Vorhaben zu flugaschehaltigen NA-Zementen und den Auswirkungen der Alkalizufuhr durch Taumittel auf Bindemittel für Beton mit alkalireaktiven Gesteinskörnungen stehen auf dem Arbeitsprogramm der Kommission.

VDZ-Kommission Emissionshandel

Mit der Revision der EU-Emissionshandelsrichtlinie im Jahr 2009 wurden die Rahmenbedingungen für den CO₂-Emissionshandel für die Zeit ab 2013 festgelegt. Eine kostenfreie Zuteilung auf der Basis von Benchmarks erhalten demnach alle Industriesektoren, für die die EU-Kommission im Jahr 2009 eine Gefahr der Produktionsverlagerung (Carbon Leakage) festgestellt hat. Diese Festlegung gilt zunächst bis zum Jahr 2014. Nach Veröffentlichung der McKinsey-Studie zum Thema Carbon Leakage im Jahr 2008 wird es eine wichtige Aufgabe sein, die Betroffenheit der Zementindustrie bei der 2013 anstehenden Risikobewertung erneut deutlich zu machen. Die europäischen CO₂-Benchmarks für die Herstellung von Grau- und Weißzementklinker wurden anhand der Emissionsdaten der 10 % effizientesten Anlagen in Europa festgelegt. Dies bedeutet gegenüber den mittleren spezifischen CO₂-Emissionen der Europäischen Zementindustrie pro produzierter Tonne Grauzementklinker in den Jahren 2007 und 2008 eine Minderung der kostenfreien Zertifikate um 11 %. In Deutschland wurde die EU-Emissionshandelsrichtlinie durch eine Novelle des Treibhausgasemissionshandelsgesetzes (TEHG) im Jahr 2011 und eine neue Zuteilungsverordnung (ZUV 2020) in nationales Recht umgesetzt. Die Kommission Emissionshandel konnte hierbei spezielle Fragen insbesondere hinsichtlich der Produkt- und Anlagenabgrenzung vorab mit der Deutschen Emissionshandelsstelle klären. Ende 2011 haben die deutschen Klinkerproduzenten ihre Anträge für die kostenfreie Zuteilung von Emissionszertifikaten für die dritte Phase des EU-Emissionshandels 2013 bis 2020 erstellt.

Im Hinblick auf die Selbstverpflichtung der Zementindustrie zur CO₂-Minderung aus dem Jahr 2000 wurden das CO₂-Monitoring auch im Berichtszeitraum weiter fortgesetzt sowie entsprechend zusammengefasst.

VDZ-Kommission Transportbeton

Die Kommission Transportbeton hat sich im Berichtszeitraum intensiv mit der Revision der europäischen Betonnorm EN

206-1 und der neuen Grundwasserverordnung beschäftigt.

Der dreijährige Revisionsprozess der EN 206-1 hat im September 2010 durch eine entsprechende Resolution des CEN/TC 104 (Concrete and related products) begonnen. In den vorliegenden Arbeitsentwurf neu aufgenommen wurden u. a. eine Tabelle zu Grundanforderungen an die Gesteinskörnung, ein Verweis auf einen technischen Bericht zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion und ein Hinweis auf die Prinzipien des „Equivalent concrete performance concept“ (ECPC) sowie des „Equivalent performance of combinations concept“ (EPCC). Ein ausführlicher Bericht zur Überarbeitung der EN 206-1 findet sich im Abschnitt „Regelwerke“ des Kapitels V.

Ein weiteres wichtiges Thema der Kommission Transportbeton im Berichtszeitraum waren die möglichen Auswirkungen des Inkrafttretens der Grundwasserverordnung für das Bauen mit Beton. Die Inhalte der Verordnung wurden analysiert und mögliche Handlungsoptionen diskutiert. Eine Ergänzung der Betonnorm um einen Abschnitt „Grundwasserverträglichkeit von Beton“ erschien der Kommission nicht zielführend, da ein solches Vorgehen vermutlich einen systematischen Prüfauftrag im DIBt auslösen würde, indem alle Baustoffnormen mit Bezug zum Grundwasser überprüft werden müssten. Ziel sollte es vielmehr sein, den Ansatz „Schwellenwerte werden im Durchschnitt über einen kurzen Zeitraum und in einem räumlich begrenzten Volumen nicht überschritten“ und ggf. das „Aussetzen“ kritischer Parameter weiter zu verfolgen. Als Argumentationshilfe verweist die Kommission auf ein Positionspapier des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) „Erläuterung des DAfStb zum aktuellen Regelungsstand der Umweltverträglichkeit von Beton“, das unter Beteiligung des Forschungsinstituts der Zementindustrie erstellt wurde und über die Internetseite des DAfStb abgerufen werden kann.

Weitere Themen der Kommissionsarbeit waren Umweltproduktdeklarationen für Betone, der aktuelle Stand des Regelwerks zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion und Sicherheitsdatenblätter für Portlandzementklinker, Zemente und Betone.

Einen Schwerpunkt der zukünftigen Arbeit sieht die Kommission in der Formulierung angemessener Anforderungen für die Bereitstellung robuster Betone. Basis für die weiteren Überlegungen hierzu ist u. a. ein

Forschungsprojekt des Forschungsinstituts mit dem Langtitel „Randbedingungen für das zielsichere Erreichen projektierter Betoneigenschaften im modernen 5-Stoff-System diverser Betonausgangsstoffe“. Dabei handelt es sich um ein Gemeinschaftsprojekt des Forschungsinstituts der Zementindustrie (FIZ) und der Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Baustofftechnik (RUB). Das Forschungsvorhaben hat eine Laufzeit vom 01.05.2012 bis zum 31.10.2014. Im Rahmen des Forschungsvorhabens soll herausgefunden werden, welche Einflussparameter in erster Linie dafür verantwortlich sind, dass über längere Zeiträume hergestellte Frischbetone fallweise unplanmäßige Eigenschaften zeigen wie z. B. eine veränderte Konsistenz, Anzeichen für Sedimentation oder eine beschleunigte oder verlangsamte Festigkeitsentwicklung. Darüber hinaus sollen Kriterien für den Entwurf von Betonzusammensetzungen erarbeitet werden, die erfüllt sein müssen, damit im wirtschaftlich optimierten 5-Stoff-System kein unerwünschtes Frischbetonverhalten auftritt und die Anfälligkeit gegenüber material- und produktionsbedingten Schwankungen möglichst gering ist – auch unter der Vielzahl von Einflüssen, die bei der Herstellung eines Betons und seiner Ausgangsstoffe auftreten können.

Dieses Thema ist insbesondere deshalb von Bedeutung, weil unerwünschte Frischbetoneigenschaften wie Sedimentation oder unplanmäßige Konsistenzveränderungen einen negativen Einfluss auf die Randzone des Betons haben können. Gerade die Qualität der Randzone ist aber von besonderer Bedeutung für die Sicherstellung der Dauerhaftigkeit des Betons. Dies gilt für dauerhaftigkeitsrelevante Eigenschaften bzgl. Bewehrungskorrosion (Carbonatisierung und Chlorideindringen) genauso wie für den Frost- und den Frost-Tausalz-Widerstand.

Die Durchführung des Projekts ist in zwei Arbeitsschritten geplant:

Im ersten Arbeitsschritt soll für vorab festgelegte Zement-Zusatzmittel-Kombinationen untersucht werden, wie die Zusammensetzung eines Frischbetons im 5-Stoff-System das Auftreten von unerwünschten Erscheinungen unter gegebenen Herstellungsbedingungen beeinflusst. Hierbei sollen solche Betonzusammensetzungen identifiziert werden, die sich bezüglich ihrer Frischbetoneigenschaften bei definierten Einflussparametern wie Temperatur, Sieblinie oder Mischzeit „sensibel“ verhalten, die also bereits eine Tendenz zu einer oder mehreren der o. a. unerwünschten Eigen-

schaften zeigen, die aber noch als geeignet für die Anwendung in der Praxis bewertet werden können. Daneben werden Betonzusammensetzungen identifiziert, die solche unerwünschten Eigenschaften nicht zeigen und als „robust“ bezeichnet werden können.

Im zweiten Arbeitsschritt soll systematisch untersucht werden, wie sich Veränderungen verschiedener Parameter, auf die der Betonhersteller üblicherweise keinen Einfluss nehmen kann, auf die im ersten Arbeitsschritt fokussierten Frischbetoneigenschaften auswirken. Hierbei sollen die Auswirkungen verfahrenstechnischer Einflussgrößen, wie z. B. Einwaagetoleranzen beleuchtet werden, aber auch der Einfluss produktionsbedingter Schwankungen in den Eigenschaften der einzelnen Ausgangsstoffe (Zemente, Fließmittel und Gesteinskörnung). Es werden sowohl als „sensibel“ als auch als „robust“ bewertete Betonzusammensetzungen untersucht.

Bei allen Überlegungen wird die qualifizierte Verarbeitung des Betons im Rahmen der gültigen Regelwerke auf der Baustelle vorausgesetzt.

Ein weiteres Arbeitspaket der Kommission bezieht sich auf die Analyse der qualitätssichernden Maßnahmen der Herstellung und Verarbeitung des Betons entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Hierzu gehört auch die Überprüfung des Systems der Konformitätskontrolle und -bewertung bzw. die Fremdüberwachung des Transportbetons.

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.

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 Förder-summe 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.

Zementherstellung und Umweltschutz

Im Bereich der Zementherstellung wie auch des Umweltschutzes besteht ein enger fachlicher Kontakt mit dem Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) und dem Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden (BBS) mit thematischem Schwerpunkt bei der Energie- und Klimapolitik, dem Immissionsschutz sowie Fragen der Nachhaltigkeit. 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 (BV Kalk) und dessen Forschungsgemeinschaft betrifft vor allem die gemeinschaftlich betriebene Aus- und Weiterbildung der Industriemeister der Fachrichtung Kalk und Zement sowie die vielfältigen Tätigkeiten auf den Gebieten des Umwelt- und Gesundheitsschutzes sowie der Arbeitssicherheit. Insbesondere in Fragen der CO₂-Emissionen und deren Erfassung wurde die Zusammenarbeit mit dem Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie im Berichtszeitraum in hervorragender Weise weiterentwickelt und vertieft.

Mit vielen Ministerien der Bundesländer und des Bundes steht der VDZ in Fragen des umweltverträglichen Einsatzes von Sekundärstoffen und der CO₂-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.

Zementanwendung

Der VDZ ist im Vorstand und in den Lenkungs-gremien 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. In Fragen der Verkehrsflächen aus Beton bringt sich der VDZ aktiv in die Gütegemeinschaft Verkehrsflächen aus Beton ein. Daneben gehören Mitarbeiter des Forschungsinstituts der Zementindustrie verschiedenen Gremien des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) an oder sind als Sachverständige in die jeweiligen Ausschüsse berufen. 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) und dem Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie (BTB). Regelmäßige Kontakte bestehen ebenfalls zur Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilebau e. V. (fdb), zum Betonverband Straße, Landschaft, Garten e. V. (SLG), zum Bundesverband Estrich und Belag e. V. (BEB) sowie zum Institut für Baustoffprüfung und Fußbodenforschung (IBF). Zudem erfolgt ein enger fachlicher Austausch mit den Herstellern und Erzeugern weiterer Ausgangsstoffe für zementgebundene Baustoffe, wie der Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber (VGB PowerTech), der Deutschen Bauchemie (DBC) sowie dem Bundesverband Mineralische Rohstoffe (MIRO). 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 Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA). 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 es besteht ein Kontaktarbeitskreis mit dem Bundesverband Mineralische Rohstoffe (MIRO).

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 Bautechnik-Verein (DBV) und der Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) vertreten. Die Leitung des GAK wechselt jährlich. 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 Betonnormen Stellung zu nehmen. In den kommenden Jahren wird der GAK insbesondere weitere Normungsaktivitäten auf europäischer Ebene zu verfolgen haben. Hierzu gehören die Überarbeitung der europäischen Betonnorm EN 206-1 durch das CEN/TC 104 und die Arbeiten des CEN/TC 351 „Bauprodukte: Bewertung der Freisetzung gefährlicher Substanzen“ sowie des CEN/TC 350 „Sustainability Assessment of Construction Works“.

Koordinierungsausschuss VDZ / Deutsche Bauchemie

Der Koordinierungsausschuss, dem Fachleute aus der Zement- und Zusatzmittelindustrie angehören, wurde im Berichtszeitraum vom VDZ geleitet. Die Obmannschaft wechselt alle zwei Jahre. Der Ausschuss befasst sich intensiv mit Fragen zum Zusammenwirken von Zement und Betonzusatzmitteln. Im Vordergrund standen im Berichtszeitraum die Wirkungsweise von natürlichen und synthetischen Luftporenbildnern sowie die Wechselwirkungen zwischen Luftporenbildnern und Fließmitteln auf der Basis von Polycarboxylatether (PCE). Darüber hinaus fand ein intensiver Austausch über die Umweltproduktdeklaration von Zement und Zusatzmitteln, über Sicherheitsdatenblätter sowie über staubarme Mörtelprodukte statt. Im Ausschuss wird weiterhin regelmäßig über die aktu-

elle Normung informiert. In der Projektgruppe Schnittstellenfragen wurde eingehend über die Wechselwirkungen zwischen Zementen und Inhaltsstoffen bauchemischer Produkte diskutiert. Es wurden Merksätze zu den Wechselwirkungen zwischen Zement und Verzögerern sowie zwischen Zement und Luftporenbildnern erarbeitet.

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 zusammenarbeiten. Der VDZ bringt sich seit vielen Jahren mit seiner technisch-wissenschaftlichen Expertise in diese Gemeinschaftsarbeit ein. Im Berichtszeitraum standen in besonderem Maße Themen des Umweltschutzes und der CO₂-Minderung im Vordergrund. In die Überarbeitung des so genannten BREF-Dokuments über die Best-Verfügbaren Techniken (BVT; englisch Best Available Techniques, BAT) hat sich der VDZ eingebracht, die Festlegung von Benchmarks für die Zuteilung der Emissionszertifikate im Rahmen des europäischen Emissionshandels wurde von Mitarbeitenden des VDZ intensiv begleitet. Die gemeinsame europäische Arbeit zu den möglichen Auswirkungen der Zementverarbeitung auf die menschliche Gesundheit wurde weitergeführt, auch wurden die Zementhersteller bei der Umsetzung der REACH-Verordnung unterstützt.

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 178 für vorgefertigte Straßenbauerzeugnisse. Besonders hervorzuheben ist die Fertigstellung der neuen „Zementnorm“ EN 197-1, die jetzt auch Zemente mit hohem Sulfatwiderstand (so genannte SR-Zemente, engl. sulfate resisting cements) regelt. Außerdem wurden im

Berichtszeitraum die Normen EN 413-1 für Putz- und Mauerbinder, EN 15743 für Sulfathüttenzement und EN 15368 für Hydraulische Binder für nichttragende Anwendungen sowie die Normentwürfe EN 13282 für Hydraulische Tragschichtbinder erstellt bzw. überarbeitet. In zunehmendem Maße gewinnt auch die baustoffübergreifende Normungsarbeit an Bedeutung. Der Mandatsentwurf M 366 der Europäischen Kommission, der auf mögliche umweltrelevante Freisetzungen 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 CEN/TC 343 aufgenommen. Hier sollen Qualitätsstandards für aufbereitete Ersatzbrennstoffe aus nicht überwachungsbedürftigen Abfällen erarbeitet werden.

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. Im europäischen Forschungs- und Ausbildungskonsortium NANOCER arbeitet der VDZ seit dessen Gründung mit. NANOCER besteht aus 30 Partnerorganisationen. Hierzu zählen Universitäten, nationale Forschungseinrichtungen und industrielle Partner. Mehr als 120 Forscher arbeiten in NANOCER 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 Organisati-

onen im nahen europäischen Ausland. Die Zusammenarbeit erfolgt auf vielfältige Weise, insbesondere in den Gremien der Europäischen Normungsorganisation CEN und des europäischen Zementverbands CEMBUREAU. Darüber hinaus unterhält der VDZ gute Kontakte mit dem indischen National Council for Cement and Building Materials (NCB), der China Building Material Federation (CBMF) und der China Building Materials Academy (CBMA). Mit der US-amerikanischen Portland Cement Association (PCA) stand der VDZ auch im Berichtszeitraum in einem regen Gedankenaustausch. Der darüber hinausgehende Erfahrungsaustausch erfolgte auf dem Gebiet des Betonstraßenbaus sowie zu 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 zur International Flame Research Foundation (IFRF), 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

Der VDZ gehört zu den Gründungsmitgliedern der European Cement Research Academy (ECRA), die im Jahr 2013 auf zehn Jahre gemeinsamer Arbeit zurückblicken kann. ECRA hat mittlerweile mehr als 40 Mitglieder, zu denen sowohl Zementhersteller und Zementvereinigungen als auch Unternehmen gehören, die auf unterschiedliche Weise für die Zementhersteller tätig sind. Seminare und Workshops werden zu verschiedenen Themen der Zementherstellung und -anwendung durchgeführt, in den meisten Fällen finden diese vor Ort in den Werken von ECRA-Mitgliedern statt. Darüber hinaus wurden von ECRA auch Expertisen zu wichtigen Einzelthemen erarbeitet. Eine sehr enge Zusammenarbeit erfolgt hierbei mit der Cement Sustainable Initiative (CSI) und dem CEMBUREAU. Die Forschungsarbeiten zur Bestimmung des biogenen CO₂-Gehalts mittels ¹⁴C-Methode wurden im Berichtszeitraum weitergeführt. Für das Forschungsprojekt zur Abscheidung von CO₂ aus Abgasen (CCS) liegen mittlerweile die Abschlussberichte von drei Projektphasen vor. Untersucht wurde, inwiefern das Post-Combustion-Verfahren sowie die Oxyfuel-Technology in der Zementindustrie eingesetzt werden können. Erstmals wurden hierzu verschiedene Ar-

beitspakete gemeinsam von Zementherstellern, industriellen Partnern aus dem Anlagenbau und der Gasherstellung sowie weiteren Forschungs- und Beratungsunternehmen bearbeitet.

ECRA wird von einem Technical Advisory Board geleitet, in dem führende deutsche und europäische Zementhersteller vertreten sind. Hierzu gehören die Unternehmen Aalborg Portland, Buzzi, Cemex, CRH, HeidelbergCement, Italcementi, Lafarge, Holcim, Schwenk, Titan Cement, Vicat sowie CEMBUREAU und der VDZ.

Vermittlung der Erkenntnisse ■

Fachveröffentlichungen, Kolloquien, Seminare und Vortragsveranstaltungen sind ein willkommener Rahmen, um die zahlreichen Arbeitsergebnisse aus Ausschüssen, Arbeitskreisen und Kommissionen sowie der Forschungstätigkeit des Instituts gegenüber den Mitgliedern und der interessierten Fachwelt zu kommunizieren. Ein Großteil der Publikationen ist über die Internet-Seiten des VDZ abrufbar bzw. über den Betonshop der BetonMarketing Deutschland GmbH unter www.betonshop.de bestellbar.

Veröffentlichungen

Die Umweltdaten der deutschen Zementindustrie (jährliche Aktualisierung) wurden ebenso wie der CO₂-Monitoring-Bericht kontinuierlich weiter erfasst und veröffentlicht.

Eine Vielzahl von Forschungsthemen ist im Berichtszeitraum bearbeitet und veröffentlicht worden. Hieraus sind im Bereich der Schriftenreihe der Zementindustrie nicht weniger als fünf neue Dissertationsbände entstanden. Eberhard Eickschen befasste sich mit den Wirkungsmechanismen luftporenbildender Betonzusatzmittel. Zur Verbesserung von Prüfergebnissen bei Beurteilung einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion trug Jürgen Bokern bei. Stefan Seeman fasste die Ergebnisse seiner Arbeit zum Einfluss der Mahlatmosphäre auf die Eigenschaften von hüttensandhaltigen Zementen zusammen. Vera Tigges beschäftigte sich mit den Möglichkeiten, die Hydratation von Hüttensanden im Hinblick auf die Optimierung von Hochofenzementen zu beeinflussen. Sören Eppers stellte den Ringtest als abgesichertes Verfahren vor, um die autogene Schwindrissneigung zu bestimmen. Neben diesen Themen wurde im Forschungsinstitut der Zementindustrie eine Vielzahl von Diplom- und Studi-

enarbeiten unterstützt, die sich mit unterschiedlichen Themen der Zementherstellung und -anwendung befassen.

Die dreimal im Jahr erscheinenden VDZ-Mitteilungen hielten aktuelle Informationen zu altbekannten Themen wie CO₂-Emissionshandel, AKR, REACH sowie verfahrens- und straßenbautechnischen Aspekten bereit. Ebenso wurden u. a. die Energiewende und die CO₂-Berichterstattung behandelt. Seit der Zusammenlegung mit den Zement-Mitteilungen hat sich das Themenspektrum um aktuelle Beiträge aus den Themengebieten Architektur und Statistik erweitert.

Zusätzlich zu den VDZ-Mitteilungen gaben wieder zahlreiche Sicherheitsmerkbblätter und -prüflisten wertvolle Hilfestellung bei Themen der Arbeitssicherheit und Gefahrenprävention.

Neben den bekannten Veröffentlichungen geben seit Ende 2011 die VDZ Bulletins, die eine Rubrik in der Zeitschrift „Cement International“ bilden, auf der Länge einer DIN-A4-Seite je Thema, Einblicke in verschiedene Forschungsbereiche und allgemeine VDZ-Themen.

Aus- und Weiterbildung

Der VDZ bietet seit mehr als 50 Jahren erfolgreich Weiterbildungsmaßnahmen für die Zementindustrie und verwandte Industriebereiche an. Das Angebot erstreckt sich von der Schulung technischer Grundlagen über die Vermittlung von speziellem Fachwissen bis hin zu langfristigen Weiterbildungskursen für Führungskräfte. Neben den anerkannten Internatslehrgängen zur Weiterbildung zum Industriemeister und Produktionssteuerer werden individuelle und maßgeschneiderte Ein- und Mehrtagesseminare zu den Themen Klinker- und Zementproduktion, Qualitätssicherung, Umweltschutz und Betontechnik angeboten. Mit den VDZ-Onlinekursen steht darüber hinaus seit 2010 ein kostengünstiges multimediales Weiterbildungsangebot im Internet zur Verfügung, das zeitlich flexibel für die individuelle bzw. werksinterne Weiterbildung genutzt werden kann.

Der Industriemeisterlehrgang Kalk/Zement wird seit 1958 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 der Prüfung vor der Industrie- und Handelskammer Düsseldorf ab. Im September 2009 startete der erste Internatsabschnitts des 24. Industriemeis-



Karl von Wedel erhält den Dyckerhoff Preis im Rahmen der Jahrestagung Zement 2011 in Düsseldorf für seine Verdienste in der Klinkerkühlerentwicklung. Das Bild zeigt den Preisträger mit den beiden Stiftern Dr. Klaus und Dr. Edith Dyckerhoff.

terlehrgangs. 19 Teilnehmer aus der Kalk- und Zementindustrie wurden theoretisch und praktisch auf die Abschlussprüfung vorbereitet, die am 15.03.2011 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 7-wöchigen 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. Im Berichtszeitraum fanden insgesamt drei Internatslehrgänge statt. Insgesamt wurden seit 1990 mehr als 350 Leitstandsfahrer in 17 Kursen fortgebildet.

Wissenschaftsstiftungen

Die 1995 gegründete 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 drei Dissertationen zu den Themen Steigerung der Energieeffizienz und Minderung der CO₂-Emissionen, Optimierung der Gattierung von Kugelmøhlen sowie Wechselwirkungen zwischen Zementhauptbestandteilen und Fließmitteln gefördert. Darüber hinaus konnten verschiedene Stipendien mit einer kürzeren Laufzeit für Praktika, Master- und

Diplomarbeiten auf dem Gebiet der Zementchemie, Verfahrens- und Betontechnik vergeben werden.

Die im Jahr 1994 ins Leben gerufene Dyckerhoff-Stiftung unterstützt seit vielen Jahren Arbeiten junger Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen im Forschungsinstitut der Zementindustrie. So wurden beispielsweise im Berichtszeitraum Arbeiten zur Optimierung von Mahlanlagen, zu Korrosionsmechanismen an Zementanlagen und zur Bewertung der NA-Eigenschaft von Zementen gefördert.

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 Vorstandes 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 Forschungsinstitut verfügt über einen modernen Gerätepark und ist auch für anspruchsvolle Grundlagenuntersuchungen optimal ausgestattet. Das Institut 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 For-

schungsinstitut in zunehmendem Maße gutachterliche und beratende Unterstützung in fachlichen Angelegenheiten im Rahmen des Vereinszwecks an. Fachlich gliedert sich das Institut in fünf Fachabteilungen.

Die Abteilung „Zementchemie“ des Forschungsinstituts befasst sich mit dem gesamten Lebensweg von Zement, angefangen mit der Herstellung über die Verwendung bis hin zum Recycling zementgebundener Baustoffe. Die Charakterisierung der Roh- und Brennstoffe sowie die Reaktionen beim Brennen von Zementklinker stehen ebenso im Fokus wie die Vorgänge beim Erstarren und Erhärten der Zemente. Auch die Wechselwirkungen verschiedener Zementhauptbestandteile untereinander oder mit Zusatzstoffen/-mitteln sowie betonschädigende Reaktionen werden intensiv untersucht. In diesem weiten Arbeitsgebiet hat neben der klassischen anwendungsbezogenen Forschung in den letzten Jahren der Dienstleistungsbereich zunehmend an Bedeutung gewonnen.

Die Herstellung von Zement beginnt mit dem Abbau des Rohmaterials im Steinbruch und dem anschließenden Klinkerbrenn- und Mahlprozess im Zementwerk. Hier setzen die Arbeits- und Forschungsschwerpunkte der Abteilung „Umwelt- und Betriebstechnik“ an. Entsprechend der Komplexität und Vielfalt der umwelt- und verfahrenstechnischen Aspekte, die bei einer umweltfreundlichen, energetisch effizienten und zugleich wirtschaftlichen Herstellung von Zement zu berücksichtigen sind, ist die Abteilung Umwelt- und Betriebstechnik aus Wissenschaftlern unterschiedlicher Disziplinen zusammengesetzt, unterstützt von Technikern und Laboranten mit langjähriger Theorie- und Praxiserfahrung. Sowohl ein Umwelt- als auch ein verfahrenstechnisches Labor und moderne Messausrüstungen für Untersuchungen und Optimierungen in Zementwerken bilden die Basis zur Durchführung umfangreicher Forschungen. Darüber hinaus bietet die Abteilung ein breit gefächertes Dienstleistungsspektrum im Bereich der Umweltgutachten, Umweltberatung und Weiterbildung an.

Die Abteilung „Umweltmesstechnik“ ist als unabhängige Messstelle bekannt gegeben. Auf Grundlage dieser Bekanntgabe können Arbeiten auch im gesetzlich geregelten Bereich durchgeführt werden. Dadurch ist die Umweltmessstelle beispielsweise auch befugt, gesetzlich geforderte Abnahmemessungen durchzuführen. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Inter-

nationalisierung der Zementindustrie werden die Leistungen der Umweltmessstelle auch verstärkt aus dem Ausland angefragt. Die Umweltmessstelle besteht aus einem interdisziplinären Team von Ingenieuren, Naturwissenschaftlern sowie Laboranten und Technikern mit langjähriger Praxiserfahrung. Auf dieser Grundlage werden Dienstleistungen in allen umweltrelevanten Bereichen angeboten. Hierzu gehören vor allen Dingen sämtliche Emissionsmessungen, die sich aus den entsprechenden Regelwerken ergeben.

Die Abteilung „Qualitätssicherung und Analytik“ führt Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsdienstleistungen durch und verantwortet die chemischen und physikalischen Untersuchungen, die das Forschungsinstitut für Dritte anbietet. Insbesondere die Güteüberwachung und Qualitätssicherung von Zement und zementhaltigen Bindemitteln durch die Überwachungsgemeinschaft gehören zu den traditionellen Kernkompetenzen des Vereins Deutscher Zementwerke. Die Abteilung übernimmt hier die Aufgaben der VDZ Überwachungsgemeinschaft als gesetzlich anerkannte Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle für Bauprodukte.

Die Abteilung „Betontechnik“ befasst sich mit aktuellen Fragestellungen auf den Gebieten der Betonausgangsstoffe sowie der Betontechnologie und Betonanwendung. Basierend auf den Erkenntnissen aus Forschungsvorhaben bietet die Abteilung ein umfangreiches Dienstleistungspaket rund um die Anwendung von Beton und anderen zementgebundenen Baustoffen, das alle wichtigen Prüfungen sowie Beratungen bis hin zu komplexen Gutachten einschließlich Bauzustandsanalysen umfasst. Auf Grund der führenden Rolle des Forschungsinstitutes bei Fragestellungen zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion werden in großem Umfang Gutachten erstellt und Bewertungen von Gesteinskörnungen vorgenommen. Das Dienstleistungsprogramm umfasst darüber hinaus alle Stufen von Zulassungsverfahren für neue Baustoffe wie z. B. die Antragstellung, die Erstellung und Durchführung des Versuchsprogramms sowie die Erstellung des Prüfberichts und eines Gutachtens über die Eignung des Produkts. Weiterhin beinhaltet das Leistungsspektrum die Erstellung von Ökobilanzen und Umweltproduktdeklarationen (EPD).

Die allgemeinen Dienste im Forschungsinstitut umfassen die Bereiche Verwaltung, Information und Datenverarbeitung mit Rechenzentrum, Bibliothek, Dokumenta-

tions- und Verlagsaufgaben sowie die mechanische und elektronische Werkstatt. Die Laboratorien des Forschungsinstituts sind akkreditiert, gleichzeitig verfügt das Institut über ein zertifiziertes Qualitäts- und Umweltmanagementsystem. Das Organigramm auf Seite 6 zeigt die Struktur des Instituts mit den einzelnen Abteilungen und der Zertifizierungsstelle für Managementsysteme, FIZ-Zert. Zum Zeitpunkt der Berichterstattung sind rund 180 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter im Forschungsinstitut beschäftigt. Das Institut stellt zurzeit insgesamt 6 Ausbildungsplätze in unterschiedlichen Bereichen zur Verfügung. Im Berichtszeitraum haben 4 Auszubildende zum Chemielaboranten und 1 Auszubildende als Kauffrau für Bürokommunikation ihre Lehre im Institut erfolgreich abgeschlossen.

Informationsstelle – Bibliothek

Zentrale Aufgabe der Informationsstelle ist die zeitnahe und umfassende Information der Mitarbeiter des Forschungsinstituts der Zementindustrie. Hierbei spielt die Bereitstellung von elektronischen Dokumenten eine Hauptrolle. So wird die seit über 25 Jahren bestehende bibliographische Literaturdatenbank zunehmend mit Zusatzinformationen wie Inhaltsverzeichnissen aufgewertet. Durch die Bereitstellung von elektronischen Dokumenten kann der schnelle Zugriff auf vorhandene Informationen unabhängig von Zeit und Ort gewährleistet werden.

Jenseits der stark wachsenden elektronischen Bestände wächst auch der klassische Bestand an konventionellen Medien weiter. Der Bestand der institutseigenen Bibliothek umfasst zurzeit ca. 41 000 Bände, zusammengesetzt aus Monographien, Serien- und Zeitschriftenbänden sowie Normen. Etwa 140 laufend gehaltene Zeitschriften gewährleisten einen aktuellen Einblick in die zentralen Fachthemen des Hauses und werden von wissenschaftlichen Mitarbeitern auf inhaltliche Relevanz hin ausgewertet. Relevante Fachliteratur findet ihren Weg mit inhaltlicher Erschließung in die Literaturdatenbank, die zurzeit etwa 78 300 recherchierbare Datensätze zu Büchern, Aufsätzen und Normen enthält.

Um die Bestände kontinuierlich auch jenseits der klassischen Buchhandelsliteratur zu erweitern, unterhält die Informationsstelle intensive Leihverkehrsverbindungen zu anderen Bibliotheken, Dokumentationsstellen und Informationseinrichtungen sowie einen umfangreichen und regen Schriftentausch mit vielen in- und ausländischen Forschungsstellen und Biblio-

theken. Auf diese Weise erhält sie Zugriff auf ansonsten schwer zugängliche Literatur aus ihren Sammelgebieten Betontechnik, Zementchemie, Verfahrenstechnik und Umweltschutz.

Die Informationsstelle ist an der Herstellung, Herausgabe und dem Versand von Veröffentlichungen des VDZ beteiligt. Neben der zeitnahen Information der Mitglieder durch den automatischen Versand von neuen Veröffentlichungen werden die VDZ-Publikationen auch im Betonshop der BetonMarketing Deutschland GmbH unter www.betonshop.de angeboten.

Jenseits der klassischen Aufgaben im Bibliotheks- und Informationsbereich ist die Informationsstelle für die Administration der VDZ-Website verantwortlich. Zum Jahreswechsel 2011/2012 erfolgte eine grundlegende Erneuerung der Seite im öffentlichen Bereich. Hierauf werden kontinuierlich die Aktualisierung und Erweiterung des hausinternen Intranets und Extranets für Mitglieder folgen.

IT-Service

In den vergangenen drei Jahren ist die IT-Infrastruktur im VDZ durch den gezielten Austausch von Hard- und Software und die Erweiterung der Bandbreite der Internetanbindung an allen drei Standorten auf einen zeitgemäßen Stand gebracht worden. Darüber hinaus wurden verschiedene Maßnahmen zur IT-Sicherheit (z. B. physischer Schutz des Serverraums) geplant und umgesetzt.

Die 180 PC-Arbeitsplätze an den Standorten Düsseldorf, Berlin und Erkrath verwenden das Betriebssystem Windows XP. Microsoft Office wird durchgängig als Standard-Office-Anwendung eingesetzt. Das ERP-Programm sowie verschiedene Spezialanwendungen an Messdatenerfassungssystemen oder im Labormanagement runden das Spektrum der eingesetzten Software ab.

Neue Herausforderungen ergeben sich durch die zunehmende Nutzung von mobilen Endgeräten. Die Nutzung dieser Geräte im Unternehmen erfordert einen Kompromiss zwischen Sicherheit und der „einfachen“ Nutzung dieser Geräte. Durch entsprechende Richtlinien und eine Sensibilisierung der betroffenen Mitarbeiter ist das hervorragend gelungen.

Um Laptops, die u. a. im Außendienst verwendet werden, vor Datenverlust zu schützen, ist im Berichtszeitraum eine Client-Backup-Lösung eingeführt worden, die mittlerweile flächendeckend im Einsatz ist.



Der Führungskreis: Volker Hoenig, Martin Schneider, Martin Oerter, Christoph Müller (hintere Reihe v.l.) und Jörg Rickert, Silvan Baetzner, Stefan Schäfer, Sascha Vogts (vordere Reihe v.l.)

In einem kontinuierlich laufenden Prozess wird das Altaktenarchiv digitalisiert. Mittlerweile sind mehrere tausend Ordner in ein digitales Archiv überführt worden.

Für die Zukunft liegt der Fokus auf weiteren Investitionen in die IT-Sicherheit bzw. die Systemverfügbarkeit.

Dienstleistungen ■

Das Forschungsinstitut der Zementindustrie erbringt gutachtliche bzw. beratende Dienstleistungen in allen Bereichen der Herstellung und Anwendung von Zement, zementgebundenen Baustoffen und vielen weiteren Baustoffen der Steine und Erden Industrie. Hierzu gehört die Wahrnehmung öffentlich-rechtlicher oder privatrechtlicher Aufgaben, z. B. durch die Arbeit als Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle, als Umweltmessstelle oder als Zertifizierungsstelle für Managementsysteme (Umwelt und Qualität). Das Forschungsinstitut deckt mit den fünf Abteilungen Zementchemie, Betontechnik, Umwelt und Betriebstechnik, Umweltmesstechnik sowie Qualitätssicherung und Analytik alle Bereiche der Zementherstellung und -anwendung ab. Das Institut ist akkreditiert und zertifiziert nach ISO 9001, ISO 14001, DIN EN ISO/IEC 17025, EN 45011 und DIN EN ISO/IEC 17021.

Die Dienstleistungen werden getrennt von den ideellen Arbeiten der Gemeinschafts-

forschung 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.

Zum Kundenkreis des Forschungsinstituts gehören Zement- und Baustoffhersteller sowie bauausführende Firmen und bauende Verwaltungen in Europa und zunehmend auch weltweit. Das Forschungsinstitut bietet Lösungen zur Effizienzsteigerung und Kostenreduzierung sowie wettbewerbsfähige Maßnahmen zur Verbesserung des Umweltschutzes, der Dauerhaftigkeit oder der Qualitätssicherung an. Es gibt Antworten auf Fragen der Zementherstellung, Chemie und Mineralogie, der Beton- und Mörtelherstellung, Umweltfragen, Fragen der Zertifizierung von Baustoffen und Managementsystemen sowie zu den immer wichtiger werdenden Themen des Wissensmanagements und der Weiterbildung.

Seinen Kunden bietet das Forschungsinstitut der Zementindustrie damit ein Dienstleistungspaket an, das alle wichtigen Prüfungen sowie Beratungen bis hin zu komplexen Gutachten umfasst. Die Kombination von aktueller Forschung und kompetenter Dienstleistung führt zu Synergien, die sich in der hohen Qualität und Praxisnähe widerspiegeln.

Mörtel und Beton

Das Forschungsinstitut der Zementindustrie bietet ein umfangreiches Dienstleistungspaket rund um die Anwendung von Beton und anderen zementgebundenen Baustoffen: Beratungen, Materialprüfungen, Gutachten, baubegleitende Eigen- bzw. Fremdüberwachungskonzepte, Überwachung von Betonherstellung und Beton-einbau. Alle Servicebausteine helfen dabei, die Qualität der Ausgangsstoffe sowie der Baustoffe sicherzustellen und Schäden an Betonbauwerken umfassend vorzubeugen.

Zulassungsprüfungen von Baustoffen werden durch alle Verfahrensstufen von der Antragstellung über das Versuchsprogramm bis hin zum Gutachten betreut. Zudem erstellt das Forschungsinstitut Ökobilanzen nach DIN EN ISO 14040 – auf Wunsch nach den Regeln der durch CEN/TC 350 für den Bausektor entwickelten Normen – und Umweltproduktdeklarationen (EPD).

Materialprüfung

- Frischbeton und -mörtel (z. B. Konsistenz, Wasserabsondern)
- Festbeton und -mörtel (z. B. Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, E-Modul)
- Dauerhaftigkeitsuntersuchungen (z. B. Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandsprüfungen, Chloridmigrationskoeffizient, Carbonatisierung, Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR))
- Untersuchungen von Gesteinskörnungen
- Untersuchungen von Zusatzmitteln
- Spezielle Verfahren zur Untersuchung des Schwindens von Beton

Beratung/Gutachten/Überwachung

- Erstellung von AKR-Gutachten (inkl. Performance-Prüfungen, WS-Grundprüfung)
- Baubegleitende Eigen- und Fremdüberwachungskonzepte
- Überwachung der Herstellung und des Einbaus von Beton
- Ökobilanzen (DIN EN ISO 14040 bzw. DIN EN 15804), Umweltproduktdeklarationen (EPD), Nachhaltigkeits-Zertifizierung von Gebäuden
- Zulassungsprüfungen zur Erlangung allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassungen (abZ), Europäisch Technischer Zulassungen (ETA) und von KOMO-Attesten mit Produktzertifikat gemäß CUR 48
- Gutachten zur Schadensanalyse und Schadensvermeidung

Zement.art

Das Programm Zement.art umfasst alle Dienstleistungen rund um die Optimierung, Herstellung und Anwendung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen:

- Erfassung und Bewertung des Status Quo (Herstellung, Eigenschaften)
- Konzept zur großtechnischen Umsetzung
- Begleitung und Auswertung von Betriebsversuchen
- Durchführung von Vorversuchen zur Erlangung von Zulassungen (national und international)
- Durchführung der Zulassungsprüfung
- Durchführung von betrieblichen Schulungsmaßnahmen
- Begleitung der baupraktischen Einführung

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 der Zementindustrie große Erfahrung bei der Beratung, Analyse und Methodenentwicklung im Bereich chemisch-mineralogischer Prüfungen an Rohstoffen, Zementen und daraus hergestellten Produkten. Das Dienstleistungsangebot umfasst schwerpunktmäßig die nachfolgenden Auftragsuntersuchungen:

- Charakterisierung von Portlandzementklinkern
- Quantitative Phasenanalyse mittels Rietveld-Verfeinerung
- Referenzuntersuchungen an Zementen und Betonausgangsstoffen nach den gültigen Normen
- Charakterisierung neuer Bindemittel
- Bestimmung der Hydrationswärme
- Sulfatoptimierung von Zementen
- Heiz- und Brennwertbestimmungen
- Gefügeanalyse an zementären Systemen

- Umweltanalytik, z. B. Spurenanalyse der Metalle und Halbmetalle
- Bestimmung des wasserlöslichen Chromats nach EN 196-10 und der ehemaligen TRGS 613
- Thermische Analyse (DSC und TG/DTA)
- Sulfatwiderstand von Zementen
- Hygienische Eigenschaften zementgebundener Baustoffe (z. B. im Trinkwasserbereich)
- Wirkungsweise von Betonzusatzmitteln

Umweltgutachten

Der hohe Stellenwert, den der Umweltschutz in der Zementindustrie hat, spiegelt sich in den zahlreichen Aktivitäten des Forschungsinstituts der Zementindustrie wider. Aufgrund der umfassenden Erfahrungen bei Anlagenbegutachtungen 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. Die Mitarbeiter des Forschungsinstituts 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. Immissionssituation
- Umweltverträglichkeitsstudien
- Anlagentechnische Betrachtungen (Stand der Technik/Beste Verfügbare Technik)
- Komplexe Ausbreitungsrechnungen
- Bodenuntersuchungen
- Schallgutachten

Technische Audits

Die Mitarbeiter des VDZ verfügen über langjährige Erfahrungen auf dem Gebiet der thermischen und mechanischen Verfahrenstechnik sowie der Umwelttechnik. Diese Erfahrungen wurden im Rahmen von Beratungen zur verfahrenstechnischen Optimierung und Energieeffizienzsteigerung von Zementwerken im nationalen und internationalen Umfeld gesammelt. So konnten zahlreiche Projekte, die die Planung und Organisation verfahrenstechnischer Untersuchungen beinhalteten, erfolgreich umgesetzt werden. Diese Untersuchungen umfassten den gesamten Produktionspro-

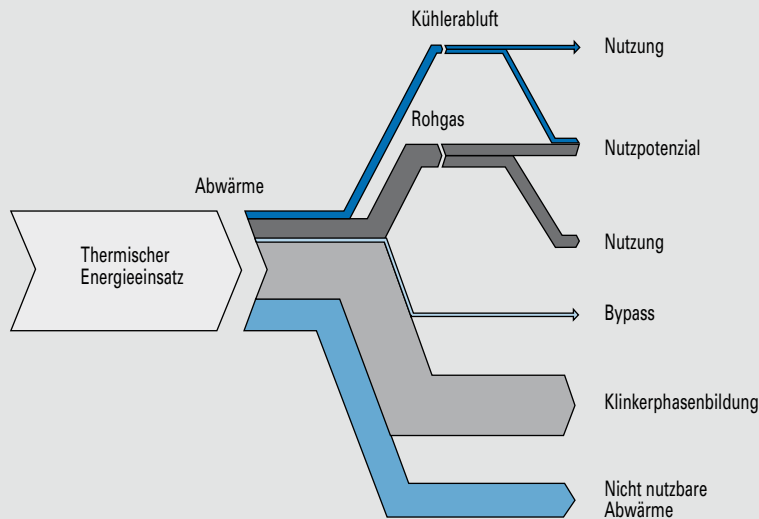
zess, wobei insbesondere der Klinkerbrennprozess sowie die Zerkleinerung des Rohmaterials und des Klinkers in Mahlanlagen im Fokus standen. Darüber hinaus wurden auch komplexe umwelttechnische Fragestellungen, wie beispielsweise die Auswirkung des Einsatzes alternativer Brennstoffe und Maßnahmen zur Reduzierung von Emissionen, bearbeitet. Selbstverständlich wurden dabei stoffliche Aspekte, wie die Entstehung von Stoffkreisläufen oder die Produktqualität, immer im Auge behalten und mit bewertet.

Verfahrenstechnische Optimierungsmaßnahmen

Optimierungsmaßnahmen werden im Rahmen von technischen Audits erarbeitet. Hierbei steht insbesondere der Ofen- und Mühlenbetrieb im Vordergrund. Im Rahmen von Ofen- und Mühlenaudits werden Themen und Problemstellungen wie Feuerungstechnik für alternative Brennstoffe, Auswirkungen des Einsatzes alternativer Brennstoffe auf den Ofenbetrieb, Verminderung von Stoffkreisläufen, primäre und sekundäre Maßnahmen zur Emissionsminderung, Minderung von CO₂-Emissionen sowie verfahrenstechnische Modellierung von Ofen- und Mahlanlagen und betriebstechnische Optimierung von Drehofen- und Mahlanlagen behandelt.

Diese technischen Audits werden als Dienstleistung den jeweiligen Kundenwünschen und Anlagenanforderungen angepasst. Wichtige Themen in Zeiten steigender Energiekosten und erhöhter Umweltauflagen sind die Minderung von Emissionen und die Reduzierung des thermischen sowie elektrischen Energiebedarfs.

Im Bereich von Prozessmessungen und Probenahmen, die im Rahmen eines Audits vor Ort durchgeführt werden, können die Mitarbeiter des VDZ ihr ganzes Know-how und ihre Erfahrung einsetzen. Die Einrichtungen des Forschungsinstituts der Zementindustrie stehen für die weitere Aufbereitung und Analyse von Proben zur Verfügung. Mithilfe moderner Mess- und Analyseverfahren können innerhalb kurzer Zeiträume Prozessmessungen an Ofen- und Mahlanlagen ausgewertet und die Ergebnisse mit der VDZ-Datenbank abgeglichen werden. Durch die umfassende Kenntnis des Zementherstellungsprozesses und der strukturierten Vorgehensweise ist eine systematische prozessstufenbezogene Potenzialanalyse bezüglich des Energieverbrauchs (siehe oberes Bild auf der folgenden Seite) und der Emissionsminderung möglich.



Energiebilanz einer Drehofenanlage als Grundlage einer Energieeffizienz-Analyse

Im Bereich der Mahltechnik hat die Erfahrung gezeigt, dass Kugelmøhlen in vielen Fällen ein hohes Potenzial für die Leistungs-fähigkeitsverbesserung haben. Die Beurteilung von Mahlanlagen erfolgt mithilfe von Møhlenaudits, die die Bewertung des mechanischen Zustands der Mahlanlage, den Füllgrad jeder Mahlkammer und den Zustand der Panzerung sowie der Mahlkörper beinhalten (siehe unteres Bild). Der Zerkleinerungsfortschritt in den Mahlkammern wird anhand von Meterproben ermittelt. Außerdem erfolgt eine Probenahme des Aufgäbe-, Grob- und Feinguts am Sichter.

Energieeffizienz-Analyse

VDZ-Dienstleistungen zur Energieeffizienz-Analyse wurden entwickelt, um potenzielle Energieeinsparungen im Zementproduktionsprozess zu identifizieren und die Energieeffizienz der gesamten Produktionslinie zu verbessern. Gewonnene Energiedaten werden mit der VDZ-Datenbank verglichen und bewertet, was eine neutrale Bewertung der elektrischen und der Brennstoff-Energieeffizienz erlaubt. Der Umfang der Energieeffizienz-Analyse wird jeweils maßgeschneidert an die spezifischen Kundenanforderungen angepasst und umfasst entweder den kompletten Herstellungsprozess oder ausgewählte Teilprozesse. Individuelle Expertenbesuche werden ebenfalls durchgeführt, um mögliche Energieeinsparpotenziale zu identifizieren.

Im Rahmen von Energieeffizienz-Analysen können komplette Unternehmen mit mehreren Zementwerken, einzelne Werke oder Teilanlagen bewertet werden. Hierbei befinden sich beispielsweise die Optimierung des Energiebedarfs für Trocknungsprozesse, die Bewertung der überschüssigen Wärmekapazität zur weiteren Verwendung – wie Wärme- und Energierückgewinnung – oder die Verbesserung der Wärmerückgewinnung im Klinkerkøhler im Fokus der Untersuchungen. Weiterhin wird der Verbesserung der elektrischen Energieeffizienz bei der Zementmahlung ein besonderes Augenmerk geschenkt. Empfehlungen zur Verminderung von CO₂-Emissionen sind ebenfalls Bestandteil der Energieeffizienz-Analysen.

Der spezifische Brennstoffenergiebedarf ist die entscheidende Kenngröße zur Beurteilung der Energieeffizienz in der Zementindustrie. Bei der energetischen Analyse des thermischen Prozesses wird zunächst der reale Zustand der Ofenanlage ermittelt. Optimierungspotenziale werden aus dem Vergleich der Istdaten mit modellierten Werten abgeleitet. Mithilfe eines Prozessmodells werden moderne Vorcalcineran-



Überprüfung einer Kugelmøhle im Rahmen eines Møhlenaudits

Zusätzlich zu den täglichen Herausforderungen des Anlagenbetriebs muss der Produktionsprozess ständig hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit überprüft werden. Nötigenfalls müssen die Anlagen und Ersatzteile so verbessert werden, dass sie zukünftigen Anforderungen gerecht werden und den letzten technologischen Entwicklungen entsprechen. VDZ-Experten diagnostizieren Schwachpunkte im Anlagenbetrieb, bieten Lösungen an und helfen bei der Beseitigung von Problemen.

Als Beispiel sei hier die Durchführung eines Ofenaudits zur Untersuchung der Stabilität des Drehrohrofenbetriebs genannt. Wesentliche Bestandteile sind dabei die Analysen der Rohmehlzusammensetzung und -homogenität, der Schwefel- und Chlorkreisläufe, des Bypasses, des Sulfatisierungsgrads, der Flammenstabilität und der eingesetzten Alternativ- und Primärbrennstoffe. Die Ofen- und Køhlerbilanzierung geben weitere Hinweise auf mögliche Verbesserungsmaßnahmen.

lagen simuliert, wobei die spezifischen Produktionsbedingungen wie Klinkerkapazität, Rohstoffbasis und Brennstoffmix individuell zugrunde gelegt werden. Um reale Betriebsbedingungen, wie z. B. Betriebschwankungen oder An- und Abfahrvorgänge, zu berücksichtigen, wird beispielsweise der Mindestenergiebedarf um 160 bis 320 kJ/kg Klinker erhöht (siehe BREF-Dokument für die Zementindustrie). Aus der Gegenüberstellung des ermittelten realen Brennstoffenergiebedarfs mit den Ergebnissen aus der Modellierung ergeben sich die jeweiligen Einsparpotenziale.

Die wesentlichen betrieblichen Optimierungspotenziale von Mahlanlagen mit Kugelmøhlen liegen in der Verbesserung des Sicht-Trenngrads sowie der Optimierung der Zerkleinerung durch Anpassung der Gattierung an die vorliegende Zerkleinerungsaufgabe. Ähnlich wie beim Brennstoffenergiebedarf für die Klinkerproduktion werden die Daten mit einer Referenzanlage aus der VDZ-Datenbank verglichen, um das Einsparpotenzial zu ermitteln.

Umweltmessungen

Das Forschungsinstitut der Zementindustrie ist seit vielen Jahren als unabhängiges Mess- und Prüfinstitut von den Umweltbehörden anerkannt. Voraussetzung für diese Notifizierung ist eine Akkreditierung auf Grundlage der internationalen Norm DIN EN ISO 17025, die in diesem speziellen Fall auch das Modul Immissionschutz umfasst. In einem mehr als ein Jahr dauernden Prüfungsprozess ist es gelungen, diese besondere Akkreditierung Mitte des Jahres 2012 für weitere fünf Jahre zu verlängern. Damit einher geht gleichzeitig auch die Verlängerung der offiziellen Bekanntgabe durch die Umweltbehörden. Somit steht den Kunden aus der Steine- und Erden-Industrie nicht nur die langjährige praktische Erfahrung der Mitarbeiter (Naturwissenschaftler, Ingenieure und Techniker) zur Verfügung. Darüber hinaus kann weiterhin die Unabhängigkeit der Mess- und Prüftätigkeiten insbesondere auch bei Beprobungen im gesetzlich gere-

gelten Bereich gewährleistet werden. Das Dienstleistungsangebot umfasst wie bisher sämtliche für Unternehmen der Zementindustrie sowie der Steine- und Erden-Industrie relevanten Bereiche:

- Planung und kompetente Abwicklung von Emissionsmessungen
- Ausarbeitung von Messplänen
- Ermittlung von Geräuschemissionen und -immissionen
- Lärminderungskonzepte und Werkslärmkarten
- Ermittlung von Immissionen durch Sprengerschütterungen
- Funktionsprüfungen und Kalibrierungen von kontinuierlich arbeitenden Messgeräten
- Begutachtung von Messstellen
- Immissionsmessungen

Aufgrund der zunehmenden Internationalisierung der Zementindustrie werden sämtliche der oben angeführten Dienstleistungen mittlerweile auch im Ausland angeboten.

Produktzertifizierung

Güteüberwachung und Qualitätssicherung von Zement und zementhaltigen Bindemitteln durch die Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle (PÜZ-Stelle) gehören zu den traditionellen Kernkompetenzen des Forschungsinstituts der Zementindustrie. Rund 580 Zemente aus 58 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 PÜZ-Stelle durch die zuständigen Bauaufsichtsbehörden erstreckt sich auf:

- Zement und zementartige Bindemittel
- Betonzusatzstoffe
- Betonzusatzmittel
- Mörtel und Beton
- Gesteinskörnungen
- Zementhaltige Zubereitungen

Zusätzlich sind die PÜZ-Stelle und die zugehörigen Laboratorien nach EN 45011 bzw. EN ISO/IEC 17025 privatrechtlich akkreditiert.

Systemzertifizierung

Die Zertifizierungsstelle FIZ-Zert zertifiziert und überwacht Managementsysteme (Qualität, Umwelt, Energie, Arbeits- und Gesundheitsschutz). FIZ-Zert ist hierfür gemäß EN ISO/IEC 17021 akkreditiert. Zertifiziert werden insbesondere Unternehmen aus der Steine- und Erden-Industrie oder vergleichbaren Industriezweigen, die sich mit der Herstellung und Anwendung von Baustoffen beschäftigen (vor allem Zement, Bindemittel, Beton, Betonwaren und -fertigteile). Grundlage der Systemzertifizierung sind die Normen EN ISO 9001, EN ISO 14001, EN 16001 bzw. EN ISO 50001 sowie OHSAS 18001. Die Kunden von FIZ-Zert können Synergien nutzen, da die Systemzertifizierung auch in Kombination mit der gesetzlich geregelten Produktzertifizierung (z. B. nach EN 197) möglich ist.

Verifizierung von CO₂-Emissionen

In den letzten Jahren hat FIZ-Zert im Zusammenhang mit dem europäischen Emissionsrechtehandel wiederkehrend CO₂-Emissionen verifiziert. Die Kunden konnten dabei sowohl von der hohen technischen Kompetenz als auch von den umfassenden rechtlichen Kenntnissen unserer Gutachter profitieren. Diese 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 Prüfungen von Emissionsberichten und die Begutachtung von Zuteilungsanträgen höchsten Ansprüchen genügen. Die gleichen Experten des Forschungsinstituts der Zementindustrie haben 2010 auch die Daten zur Benchmarkbestimmung der europäischen Zementindustrie für die EU-Kommission geprüft und verifiziert.

I

Verfahrenstechnik der Zementherstellung

23



Foto: Steffen Fuchs/ HeidelbergCement

Reinigungsarbeiten am Ofeneinlauf

Anlagenbetrieb ■

CFD-Simulation der Mitverbrennung im Calcinator

In Voralcineranlagen der Zementindustrie werden aus Kostengründen und zur Sicherung der Ressourcen alternative Brennstoffe (ABS), wie z. B. aufbereitete Fraktionen aus Industrie-, Gewerbe- sowie Siedlungsabfällen, Reifenschnitzel und Tiermehle eingesetzt. Voralcineranlagen bieten dabei eine besondere Flexibilität, da alternative Brennstoffe an mehreren Feuerstellen auf unterschiedlichem Temperaturniveau zugegeben werden können. Neben wirtschaftlichen Kriterien spielen bei der Auswahl von alternativen Brennstoffen nicht zuletzt physikalische und chemische Eigenschaften eine entscheidende Rolle, da sie Auswirkungen auf den Ofenbetrieb haben können. So beeinflussen Partikelgröße, Flugfähigkeit und Aufheizverhalten sowie die Gehalte an Chlor, Schwefel, Alkalien und Stickstoff des Brennstoffs beispielsweise den zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzung und damit den Entsäuerungsprozess sowie die Emissionen z. B. durch veränderte NO_x -Bildung. Diese Änderungen sind bislang nur schwer vorab zu erfassen. Daher sind heute bei Einsatz alternativer Brennstoffe experimentelle Versuche bzw. Optimierungen und z. T. Umbauarbeiten üblich.

Zur besseren Vorhersage möglicher Änderungen der Vorgänge im Calcinator hat sich das Forschungsinstitut daher an einem AIF-Forschungsvorhaben mit dem Ziel beteiligt, die Vorgänge in Calcinatoren beim Einsatz von Alternativbrennstoffen mittels CFD-Simulation (computational fluid dynamics) besser analysieren zu können. Aufbauend auf den Erkenntnissen zur Simulation der Verbrennungsvorgänge beim Einsatz von Kohle wurden die Vorgänge beim Einsatz flugfähiger Fraktionen aus Industrie- und Gewerbeabfällen, die den Hauptteil der im Calcinator eingesetzten Brennstoffe ausmachen, untersucht. 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 dieses Forschungsprojekt.

Wesentliche Teilmodelle zur Beschreibung des Prozesses wurden dabei neu entwickelt bzw. angepasst. Einzelne Teilmodelle zum fluiddynamischen Verhalten und zum Ausbrand alternativer Brennstoffe wurden anhand der Ergebnisse von Laborversuchen verifiziert und zu einem methodischen Ge-

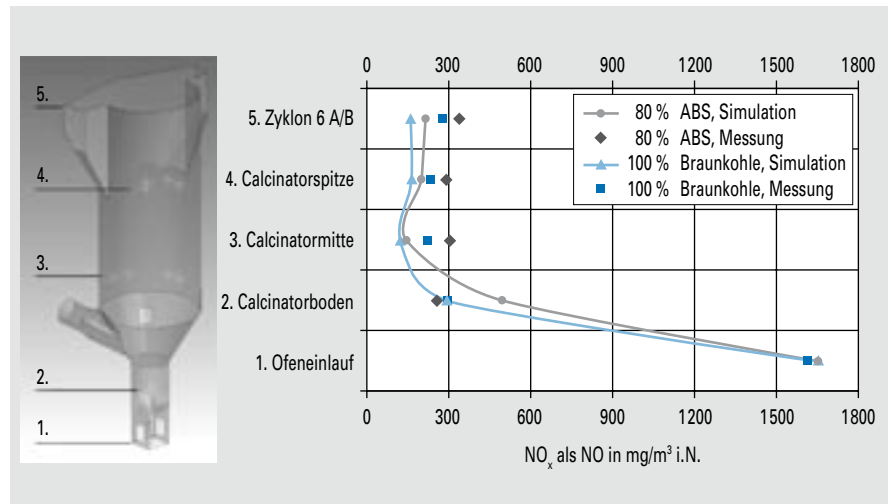


Bild I-1: Vergleich des gemessenen und simulierten Verlaufs der NO_x -Konzentrationen für den Betrieb mit 100 % Braunkohlenstaub bzw. 80 % alternativen Brennstoffen

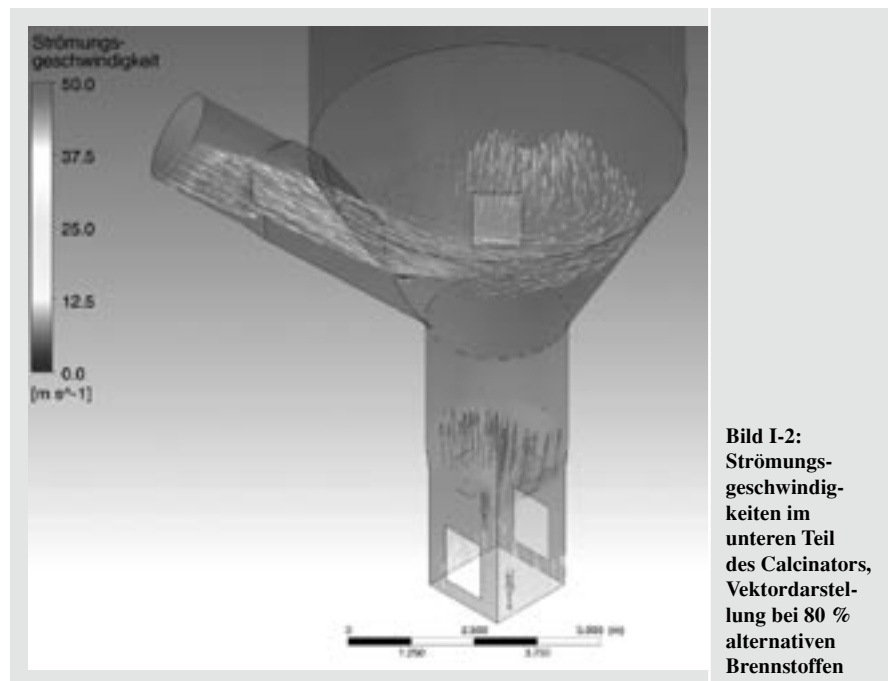


Bild I-2: Strömungsgeschwindigkeiten im unteren Teil des Calcinators, Vektordarstellung bei 80 % alternativen Brennstoffen

samt-konzept vereint. Durch umfangreiche Betriebsmessungen an einer Industrieanlage wurden die Simulationsergebnisse mit realen Ergebnissen verglichen. Dabei zeigte sich, dass die mithilfe des Simulationsmodells berechneten Gaskonzentrationsprofile im Calcinator von O_2 , CO_2 , CO im Wertebereich der Messdaten liegen und die von NO_x tendenziell richtig wiedergegeben werden (**Bild I-1**).

Insgesamt wird deutlich, dass die grundlegenden Prozessgrößen im Rahmen der Mess- und Modellierungsunsicherheiten richtig vorhergesagt werden. Somit ist der entwickelte Simulationsansatz dazu geeignet, unterschiedliche Betriebszustände bei veränderten Randbedingungen, Brennstoffwechseln oder Modifikationen der Anla-

geometrie tendenziell vorauszuberechnen. Neben dem Vergleich der messtechnisch erfassbaren Größen bietet die Simulation jedoch weitere Möglichkeiten, Veränderungen im Prozess durch Änderungen des Brennstoffmixes vorherzusagen und zu analysieren.

In **Bild I-2** ist beispielsweise die berechnete Strömungsgeschwindigkeit im unteren Bereich des Calcinators bis zum tangentialen Eintritt der Tertiärluft im konischen Bereich dargestellt. Es wird deutlich, dass Gasgeschwindigkeiten im Steigschacht von bis zu 50 m/s auftreten. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit beträgt hier ca. 30 m/s. Diese hohe Geschwindigkeit führt zu einer sehr kurzen Verweilzeit der Einsatzstoffe in der Reduktionszone von we-

niger als einer Sekunde. Durch die tangentiale Einströmung der Tertiärluft wird die von unten kommende, mit Partikeln beladene Strömung im konischen Teil eingeschnürt und an die seitliche Wand neben der Tertiärluft-Einströmung gedrängt. An der gegenüber liegenden Seite bildet sich ein Staupunkt, bevor auch die sauerstoffreiche Tertiärluft nach oben abgelenkt wird und sich langsam mit der brennstoffreichen Strähne vermischt. Die hohen Strömungsgeschwindigkeiten im unteren Teil des Calcinators führen dazu, dass sich hier (in der Reduktionszone) vorwiegend schwere Partikel aufhalten, während leichtere Partikel aufgrund der fluiddynamischen Kräfte sehr schnell in die obere Oxidationszone transportiert werden und dort ausbrennen (**Bild I-3**).

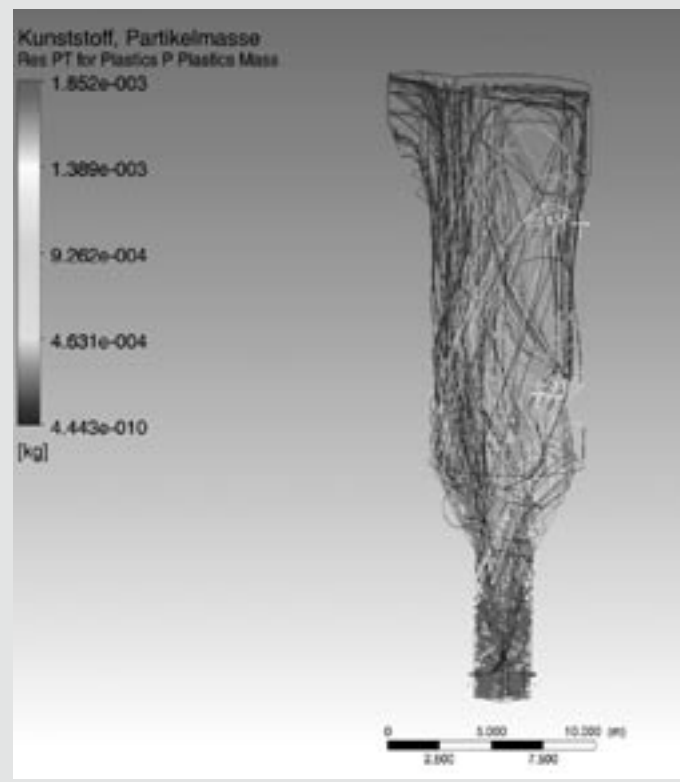
Insgesamt wird deutlich, dass durch die Kombination aus Messung und Simulation eine detailliertere und weiter gehende Analyse der Abläufe im Calcinator unter realitätsnahen Bedingungen möglich ist, als dies allein durch Messungen der Fall wäre. Weiterhin steht mit der entwickelten Methodik ein Werkzeug zur Beurteilung von Verbesserungen vorhandener und zur Auslegung neuer Calcinatoren zur Verfügung.

Mögliche Ansatzpunkte für Optimierungen mithilfe der CFD-Simulation ergeben sich in den folgenden Punkten:

- Berechnung des optimalen Aufbereitungsgrads (Feinheit) der Brennstoffe hinsichtlich der Sinkgeschwindigkeit bzw. der Flugeigenschaften
- Festlegung des optimalen Zuführungsorts der unterschiedlichen Brennstoffe hinsichtlich Verweilzeit und Ausbrand
- Optimierung der konstruktiven Gestaltung von Calcinatoren hinsichtlich Strahlenbildung und verbesserter Mischung

Die genannten Kriterien zur Optimierung müssen von den Anlagenbetreibern vor dem Hintergrund schwankender Rohstoff- und Brennstoffqualitäten sowie unterschiedlicher Bauarten und Betriebsweisen der Ofenanlagen jeweils einer individuellen Prüfung unterzogen werden. Dazu ist eine detaillierte Brennstoffcharakterisierung unumgänglich. Als Weiterentwicklung der CFD-Simulation von Vorcalcinieranlagen sind mittelfristig die Untersuchung der Wechselwirkung des SNCR-Verfahrens mit der gestuften Verbrennung und die Untersuchung bevorzugter Orte der Ansatzbildung im Calcinator geplant.

Bild I-3:
Partikelflugbahnen des Kunststoffanteils des alternativen Brennstoffs



Feuerfeste Materialien

Das durch den VDZ-Arbeitskreis „Feuerfeste Materialien“ zusammengestellte und im VDZ-Merkblatt Vt 16 (**Bild I-4**) schriftlich festgehaltene Wissen über feuerfeste Zustellungen in Zementdrehöfen ist ein wertvoller Leitfaden für den Praktiker in der Industrie. Insbesondere die detaillierten Darstellungen und Beschreibungen der eingesetzten Methoden und Verfahren zur Einbringung von geformten feuerfesten Erzeugnissen in den Zementdrehofen sowie die beispielhafte Darstellung von typischen Ausmauerungsschäden und Aspekten der Arbeitssicherheit sind für die Praxis von hohem Wert. Darüber hinaus werden Empfehlungen zur Eingangskontrolle gegeben sowie Techniken zur Zustandsdiagnose feuerfester Ausmauerungen beschrieben.

Die Lebensdauer der feuerfesten Ausmauerung im Drehofen hängt hauptsächlich von drei verschiedenen Parametern ab, nämlich von

- den generellen Betriebsbedingungen der Anlagen,
- dem mechanischen Zustand des Drehofens, hier insbesondere von der Ofenmantelovalität im Bereich der Laufringe sowie dem Aufheizen und Abkühlen des Ofens, sowie von
- der Wahl der feuerfesten Materialien und ihrem ordnungsgemäßen Einbau und ihrem Einsatz in den entsprechenden Zonen.



Bild I-4: Titel des VDZ-Merkblatts Vt 16 „Feuerfeste Materialien“

In Anbetracht der Anforderungen und Belastungen, denen das Feuerfestmaterial in einem Zementdrehofen ausgesetzt ist, wird eine fachgerechte Installation der feuerfesten Ausmauerung helfen, eine längere Lebensdauer zu garantieren und einige Belastungen auszuschließen, die gewöhnlich einen vorzeitigen Verschleiß verursachen. Die beim Einbau verwendeten Zustellmethoden haben dabei einen wesentlichen

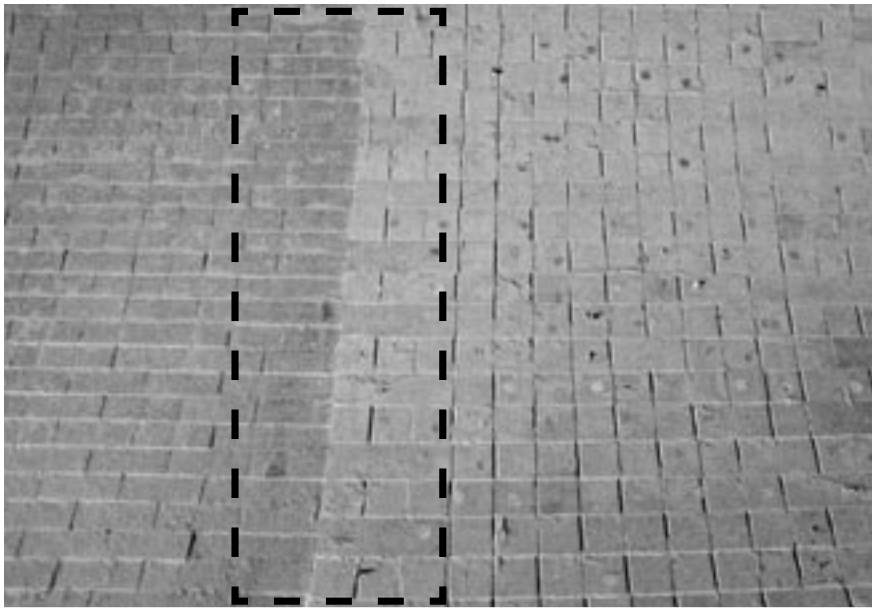


Bild I-5: Übergang zweier Blöcke im Verbundmauerwerk

Einfluss. Die Einbaumethoden müssen generell drei Voraussetzungen erfüllen:

- Die Sicherheit für das Einbaupersonal muss gewährleistet werden.
- Die Einbauqualität muss entsprechend hoch sein, sodass das Futter fest am Ofenmantel anliegt und ein späteres Lockern oder Verdrehen weitestgehend vermieden wird.
- Nicht zuletzt muss eine akzeptable Ausmauerungsgeschwindigkeit realisiert werden, um die Stillstandzeiten der Anlage möglichst gering zu halten.

Der Einbau von Steinen im Drehrohrföfen wird entweder nach der Spindel- oder der Klebmethode, mit Mörtel, knirsch, mit Blechen oder mithilfe von Holzbögen, „Pogo Sticks“ Pneumatik bzw. Hydraulikbögen, durchgeführt. Um spiralförmige Futterverdrehung im Drehföfen zu vermeiden, werden in einigen Drehföfen im betroffenen Bereich die Steine auf Verbund gemauert (Bild I-5). Dabei werden die im Verbund gemauerten Segmente maximal auf eine Länge von 5 m eingebaut. Längere in Verbund gemauerte Abschnitte sind nicht empfehlenswert, damit im Falle von Schäden Teilbereiche erneuert werden können.

Im Bereich des Ofeneinlaufs, Ofenauslaufs und in Satellitenkühlern wird das so genannte Kammfutter eingesetzt. Das Kammfutter ist ein aus verschiedenen Steinstärken aufgebautes Futter. Es hat die Aufgabe, das Brenngut zu mischen und somit die Oberfläche des Brennguts zu vergrößern, um einen besseren Wärmeübergang sowohl

beim Erwärmen des Rohmaterials als auch beim Kühlen des Klinkers zu erreichen.

Bei Ofenköpfen von Vorcalciniieranlagen, die aufgrund der Anbindung an die Tertiärluftleitung sehr große, mit Feuerfestmaterial zuzustellende Flächen aufweisen, kommt es immer wieder zu einem frühzeitigen Verschleiß der Ausmauerung. Um dies zu verhindern, sollten hoch abriebfeste Steinqualitäten mit Anteilen an Al_2O_3 von mindestens 50 % im unteren Bereich und von ca. 60 bis 65 % oder 80 bis 85 % im oberen Bereich eingesetzt werden. Auch ist in diesem Bereich der Einsatz von Magnesiaspinellsteinen adäquat. Besonderes Augenmerk sollte auf die Verankerungen gelegt werden. Entsprechende hoch feuerfeste Stahlqualitäten und eine ausreichenden Menge an Ankern (mindestens 6 bis 9 Anker pro m^2) sollten verwendet werden. Des Weiteren muss die Anzahl, Breite und Ausführung der Dehnfugen ausreichend dimensioniert werden, um vorzeitiges Versagen der Ausmauerungssegmente zu vermeiden.

Bei Trocknungs- und Aufheizprozeduren ist zu unterscheiden, ob eine komplett neu zugestellte Ofenanlage aufzuheizen ist oder nur feuerfeste Steine in Teilbereichen des Drehföfens ausgetauscht wurden. Das Trocknen und Aufheizen des Feuerfestmaterials einer komplett neu zugestellten Ofenanlage wird mit dem Aufheizen von Vorwärmer, Tertiärluftleitung und Klinkerkühler begonnen. Hierfür werden spezielle Gas- oder Leichtölbrenner eingesetzt, die von Spezialfirmen geliefert und betrieben werden. Beim Aufheizen sind unbedingt

die Aufheizkurven der eingesetzten feuerfesten Massen einzuhalten, die vom jeweiligen Hersteller angegeben werden. Hierzu werden jeweils die Gastemperaturen nach dem aufzuheizenden Anlagenteil gemessen. Dabei ist eine Temperaturmessung für jede Zyklonstufe erforderlich.

Heutige Feuerfestzustellungen werden an die veränderten Brennbedingungen mit dem Einsatz von Alternativbrennstoffen angepasst. Einer Verlängerung der Sinterzone muss durch eine Verlängerung der Zone mit hochfeuerfesten Steinen, die im Wesentlichen aus magnesitischer Zustellung besteht, Rechnung getragen werden. So werden heute Öfen mit hohem Alternativbrennstoffeinsatz in hohem Maße mit magnesitischen Steinen zugestellt. Heutzutage sind durch die Entwicklungen der Zulieferer Steinqualitäten erhältlich, die widerstandsfähiger gegenüber den thermischen, chemischen, mechanischen und sogar den Kombinationen der genannten Belastungen sind. Die erhöhten Strapazierfähigkeiten werden durch die gezielte Einstellung der Porenmenge und -größe sowie den Einsatz von qualitativ hochwertigen Rohstoffen und deren Mischungen realisiert.

Ursachen und Minderung von Korrosionsschäden im Abgasweg von Drehföfenanlagen

Korrosion verursacht in der Zementindustrie jährlich vermeidbare Schäden in Millionenhöhe. Betroffen ist die ganze Anlage des Klinkerbrennprozesses, wobei in den verschiedenen Bereichen des Produktionsprozesses unterschiedliche Arten der Korrosion auftreten. Der durch die Korrosion verursachte Instandhaltungsmehraufwand der Anlage stellt eine wirtschaftliche Belastung der Betriebe dar. Dies ist v. a. auf die zusätzlichen Materialkosten, den gesteigerten Personaleinsatz und verlängerte Produktionsausfälle aufgrund von ungeplanten und insbesondere in die Länge gezogenen Stillstandzeiten zurückzuführen. Dennoch wird die Behebung von Korrosionsschäden in der Zementindustrie vielerorts immer noch als nicht vermeidbarer Kostenfaktor im Bereich der allgemeinen Instandhaltung angesehen.

Nach konstruktiven Diskussionen mit der Industrie hat der VDZ in Kooperation mit dem Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen ein Forschungsvorhaben initiiert, um die Ursachen der Korrosionsphänomene im Abgasweg von Drehföfenanlagen, der so genannten Niedertemperaturkorrosion, zu untersuchen. Mithilfe der in diesem Forschungsprojekt erar-

beiteten Ergebnisse sollen Lösungsvorschläge zur Reduzierung der Korrosion formuliert und der Industrie zur Verfügung gestellt werden. Diese Empfehlungen sollen den Betreibern die Basis für einen jeweils standortspezifisch geeigneten Korrosionsschutzplan liefern.

In der Praxis ist das Problem der Niedertemperaturkorrosion bestens aus den stetigen Reparaturmaßnahmen während der Winterrevisionen bekannt (**Bild I-6**). Basierend auf den Betriebserfahrungen der Werke wurde der Ofenabgasfilter als das im Abgasweg am stärksten belastete Aggregat identifiziert. Aus diesem Grund wird der Fokus der geplanten Untersuchungen auf diese Anlagenkomponente gelegt.

Die im Werk beobachteten Korrosionsschäden zeigen häufig den Habitus von Nass- bzw. Säurekorrosion auf. Als Ursache wird in den meisten Fällen das Auftreten von Schwefelsäure diskutiert, welche durch die Unterschreitung des Säuretaupunkts entsteht bzw. aus der Gasphase auskondensieren soll. Bis heute wurden jedoch keine belastbaren Untersuchungen durchgeführt, mit denen eindeutige qualitative oder gar quantitative Mengen an SO_3 bzw. H_2SO_4 im Rohgas und Reingas von Drehofenanlagen nachgewiesen wurden. Des Weiteren stellt sich grundlegend die Frage, ob Säuren in dem vorherrschenden Milieu überhaupt schädigend wirken können und nicht unmittelbar durch die in hohen Mengen vorhandenen basischen Stäube neutralisiert werden. Deshalb wurde im Rahmen des Forschungsprojekts eine neue Messtechnik zur Bestimmung von SO_3 im Rohgas entwickelt (**Bild I-7**). Die Messmethode entspricht der VDI-Richtlinie 2462 Blatt 2 (Stand 2010) und ist für den Einsatz in hoch staubhaltigen Gasen konzipiert. Dadurch soll erstmals der korrekte Nachweis von SO_3 bzw. H_2SO_4 im Rohgas realisiert werden. Des Weiteren werden Laborversuche durchgeführt, um das Säureabsorptionspotenzial verschiedener Stäube zu untersuchen.

Zur Bearbeitung der metallurgischen Aspekte des Forschungsprojekts wurde eine Kooperation mit dem Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen eingegangen. Neben Untersuchungen von bereits geschädigten Anlagenteilen werden dort Labor- und Auslagerungsversuche durchgeführt. In den Versuchen werden unterschiedliche Stahllegierungen auf ihren Korrosionswiderstand gegenüber der im Abgas von Drehofenanlagen spezifisch auftretenden Korrosivitätsbelastungen geprüft. Die Langzeitauslagerungsversuche werden in

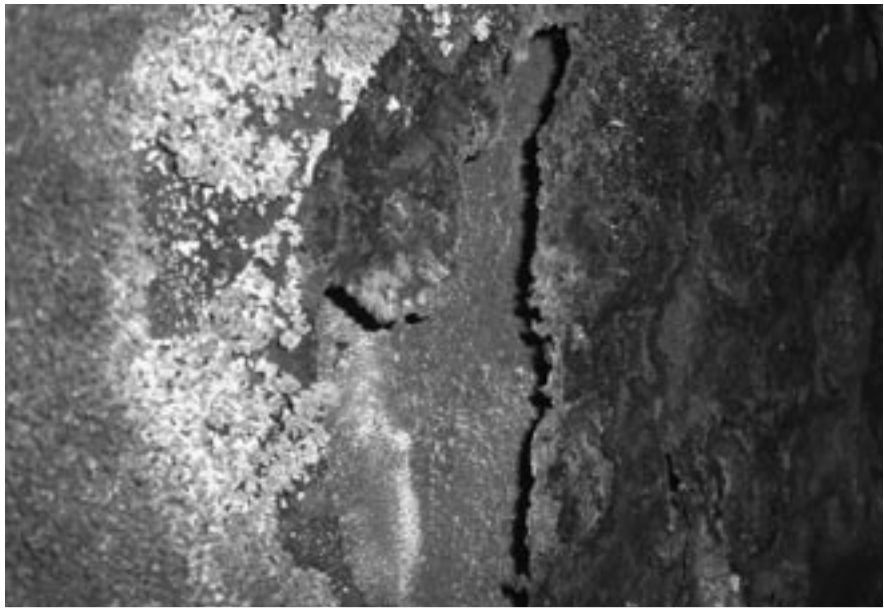


Bild I-6: Stark korrodierte Seitenwand eines Ofenabgasfilters



Bild I-7: SO_3 -Messung im Reingas einer Zementofendrehanlage nach der VDI-Richtlinie 2462 Blatt 2 (Stand 2010)

verschiedenen Zementwerken mit unterschiedlichen Abgasbedingungen durchgeführt. Dabei werden die Korrosionsproben in besonders stark belasteten Bereichen von Ofenabgasfiltern ausgelagert und nach Ablauf der vorgegebenen Auslagerungszeit auf ihren Materialverlust hin untersucht. Durch die Zusammenführung der Ergebnisse des Forschungsinstituts und des Instituts für Eisenhüttenkunde soll ein möglichst vollständiges Bild der dargestellten Problematik erstellt werden.

Auch wenn metallische Korrosion in Zementdrehöfen letztendlich mit keiner material- oder betriebstechnischen Maßnah-

me jemals vollständig vermeidbar sein wird, wird eine wesentliche Verminderung der Korrosionsraten angestrebt, die zu erheblich längeren Standzeiten der einzelnen Anlagenaggregate führen soll.

Drehofenfeuerungen für den Einsatz alternativer Brennstoffe

Vor mehr als 25 Jahren hat die deutsche Zementindustrie begonnen, in nennenswerten Mengen alternative Brennstoffe zur Deckung des thermischen Energiebedarfs des Klinkerbrennprozesses einzusetzen. Aufgrund ihrer ökonomischen und umweltrelevanten Vorteile wuchsen die eingesetzten Mengen dieser „neuen Brenn-



Bild I-8: Heterogene Zusammensetzung fester alternativer Brennstoffe

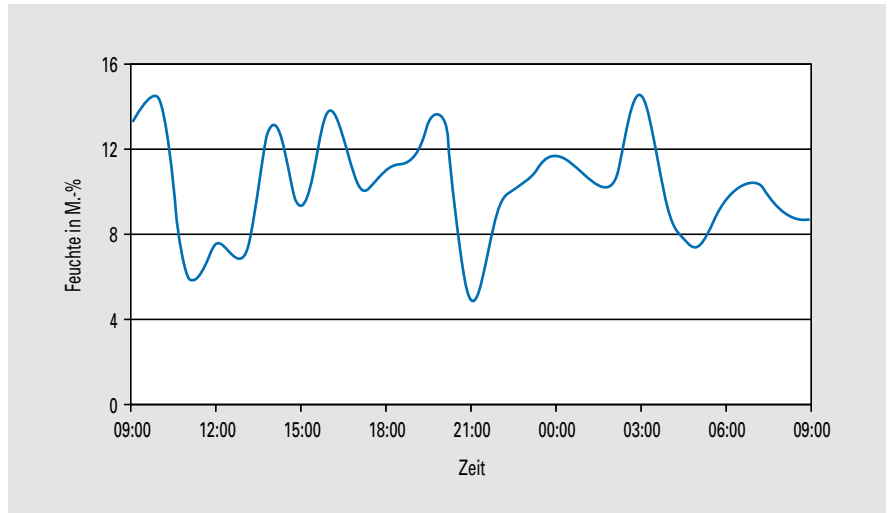


Bild I-9: Schwankungen des Feuchtegehalts alternativer Brennstoffe (Fluff) bei der Aufgabe zur Drehofenfeuerung

stoffe“ rasch an. Diese alternativen Brennstoffe unterscheiden sich hinsichtlich Beschaffenheit und Verbrennungseigenschaften von den bisher eingesetzten Brennstoffen, vor allem von Kohlenstaub. Die Betriebserfahrungen der Werke zeigen, dass hohe Mengen alternativer Brennstoffe in der Drehofenfeuerung die maximale Flammentemperatur senken und zu höheren Temperaturen im Ofeneinlauf führen können. Bei hohen Einsatzraten dieser Brennstoffe in der Drehofenfeuerung steigen daher die Anforderungen an den Brenner und den Ofenbetrieb.

In ihrer Entwicklung erfuhren die Drehofenbrenner einige signifikante Fortschritte in ihrer Anpassung an die jeweils eingesetzten Brennstoffe. Heute vielfach eingesetzte Mehrkanal-Drehofenbrenner ermöglichen die zeitgleiche Verbrennung von mehreren Brennstoffen mit unterschiedlichen Verbrennungseigenschaften. Moderne Drehofenbrenner sind durch eine Vielzahl an Lanzen, Rohren und Ringkanälen charakterisiert, die flexibel die Verbrennung von grobstückigen und gemahlenden, flüssigen und viskosen sowie gasförmigen Brennstoffen ermöglichen. Individuell auf den Brennstoff abgestimmte Verwirbelungssysteme mischen die alternativen Brennstoffe gezielt in die Flamme ein.

Übliche konventionelle Brennstoffe werden aus natürlich vorkommenden Ressourcen wie Kohle, Erdöl oder Erdgas hergestellt. Nach einer entsprechenden Aufbereitung können diese direkt als Kohlenstaub, Heizöl oder Heizgas verwendet werden. Alternative Brennstoffe stammen oft aus Materialien, die für andere Verwendungszwecke produziert oder verwendet

wurden und am Ende ihrer Nutzungsdauer auf einem thermischen Weg weiterverwertet werden. Typischerweise werden alternative Brennstoffe als abfallstämmige Brennstoffe aus fossilen und biogenen Grundmaterialien oder als Biobrennstoffe aus Biomasse eingestuft. Im Gegensatz zu Kohlenstaub, der homogen in seinen Eigenschaften ist und eine hohe spezifische Oberfläche aufweist, sind feste alternative Brennstoffe gekennzeichnet durch eine vergleichsweise höhere Heterogenität (**Bild I-8**), höhere Feuchte, geringere spezifische Oberfläche und höhere Schwankungen in ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften, die die Verbrennung beeinflussen. Das **Bild I-9** zeigt beispielhaft die Schwankungen des Feuchtegehalts eines festen alternativen Brennstoffs (Fluff) für die Drehofenfeuerung im Verlauf eines Tages. Die Heterogenität der Brennstoffe sollte sich dabei in gewissen Grenzen bewegen. Aus der betrieblichen Praxis haben sich typische Anforderungen an die Beschaffenheit fluffartiger alternativer Brennstoffe für den Einsatz in der Drehofenfeuerung bewährt:

- Heizwert (Brennstoffgemisch): 19 bis 25 MJ/kg
- Feuchtegehalt: 10 bis 25 M.-%
- Kornform: bevorzugt 2-dimensionale Partikel
- Korngröße: 2-dimensionales Material: max. 30 mm Kantenlänge
3-dimensionales Material: max. 20 mm Durchmesser
- Schüttdichte: 0,1 bis 0,2 t/m³

Die Einstellung der Drehofenfeuerung muss auf den eingesetzten Brennstoff bzw. die verwendete Brennstoffmischung abge-

stimmt werden. Mit einer einstellbaren Brennerluft, bei vielen Brennern aufgeteilt in mehrere Luftströme, kann aktiv auf die Gestaltung der Flamme und die Verbrennung der Brennstoffe Einfluss genommen werden. Mit der Geometrie des Ausströmsystems am Brennermund und der gezielten Einstellung der Brennerluft lassen sich die Länge, Divergenz und Rotation der Flamme einstellen sowie durch Vermischung der Brennstoffe mit der Sekundärluft die Verbrennung beeinflussen.

Vergasung von heterogenen Brennstoffen

Eine Möglichkeit zur Stabilisierung des Ofenbetriebs beim Einsatz von niederkalorischen inhomogenen alternativen Brennstoffen bietet die Pyrolyse der Brennstoffe mithilfe eines Plasmabrenners. Mittels ionisierter Gasmoleküle – dem Plasma, welches durch einen elektrischen Lichtbogen erzeugt wird – können in einer Brennkammer sehr hohe Temperaturen erzielt und so u. a. alternative Brennstoffe pyrolysiert werden. Es entsteht ein Brenngas, das aufgrund der sauerstoffarmen Atmosphäre während der Vergasung hohe Anteile an Kohlenmonoxid und Wasserstoff enthält. Dieses Brenngas kann mit Temperaturen bis zu 1 000 °C im Calcinator eines Zementdrehofens genutzt werden. Im Gegensatz zum direkten Einsatz heterogener Brennstoffe im Calcinator kann dieser stabiler und mit verminderten Prozessschwankungen betrieben werden, da die Unterschiede in der Zusammensetzung sowie der Feuchte vergleichmäßigt werden. Die Erzeugung des Lichtbogens bedarf einer relativ hohen elektrischen Energiezufuhr. Dieser Aufwand ist im Hinblick auf die Gesamtenergiebilanz dem positiven Nutzen – der Vergleichmäßigung des Ofenbetriebs

und der Brennstoff- sowie CO₂-Einsparung – gegenüberzustellen.

Anhand eines am FIZ entwickelten Prozessmodells zur Bewertung des Einsatzes des entstehenden Brenngases im Klinkerbrennprozess wurden am Forschungsinstitut der Zementindustrie im Rahmen eines europäischen Forschungsprojektes (Kurzform EDEFU) umfangreiche Simulationsstudien durchgeführt. Experimentelle Untersuchungen zur Vergasung mittels Plasma wurden von einem Projektpartner an Brennstoffproben von Klärschlamm, Tiermehl und Fluff realisiert. Die so ermittelten Brenngaszusammensetzungen und Temperaturen bilden die Eingangsdaten für die Prozessmodellierung. Die Simulationen erlauben hierdurch konkrete Aussagen über die Auswirkungen der jeweils erzeugten Brenngase auf den Anlagenbetrieb.

Prinzipiell ist es möglich, den gesamten Energiebedarf des Calcinators aufgrund seines im Vergleich zur Sinterzone niedrigen Temperaturniveaus durch das Brenngas aus dem Plasmabrenner bereitzustellen. Das Brenngas weist zwar einen geringeren Heizwert auf als der ursprüngliche Brennstoff, es besitzt allerdings durch die Energiezufuhr des Plasmas einen hohen Anteil an fühlbarer Wärme. Es muss somit eine geringere Brennstoffmenge vergast werden, um dasselbe Energieniveau der direkten Verbrennung zu erzeugen. Basierend hierauf wurde theoretisch eine Reduzierung der im Prozess entstehenden CO₂-Emissionen von bis zu 7 % im Vergleich zur Verbrennung fossiler Brennstoffe ermittelt. Dieser verzeichnete positive Effekt hängt maßgeblich von der Eintrittstemperatur des Brenngases ab, da mehr als 40 % der Energie durch fühlbare Wärme dem Calcinator zugeführt wird. So kann bei Brenngastemperaturen unterhalb von 750 °C die erforderliche Energie- und somit Gasmenge nicht mehr gewährleistet werden. Die Brennstoffaschen, die bei dieser Technologie nicht direkt dem Brenngut zugeführt werden, können dem Rohmaterial aus der separaten Vergasung zugegeben werden. Ein sehr guter Ausbrand der Aschen ist hierfür eine Voraussetzung.

Durch diese Studie wurde gezeigt, dass der Energiebedarf des Calcinators bei simultaner Minderung von Prozessschwankungen und CO₂-Emissionen durch ein Brenngas entsprechender Qualität gedeckt werden kann. Die Gesamtbilanz ist abhängig vom elektrischen Energiebedarf des Plasmabrenners und der resultierenden indirekten CO₂-Emissionen. Diese Nutzen-

Bild I-10:
Momentaufnahme der dreidimensionalen simulierten Mahlkörperbewegung

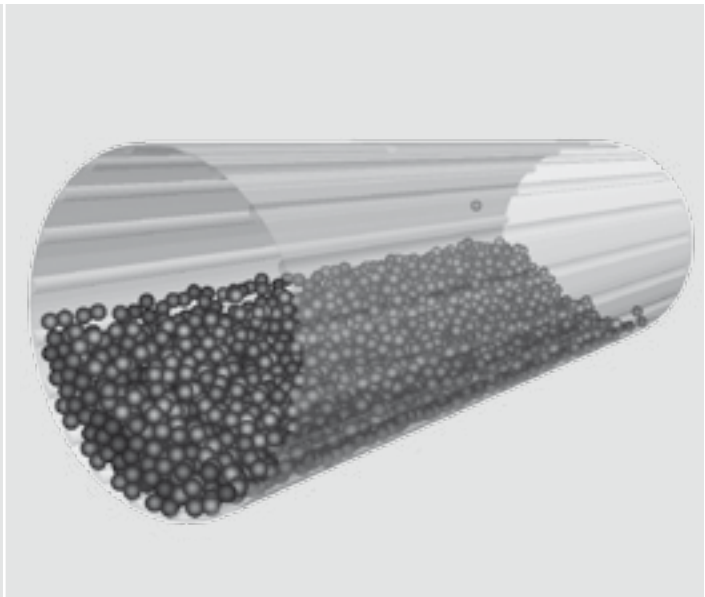
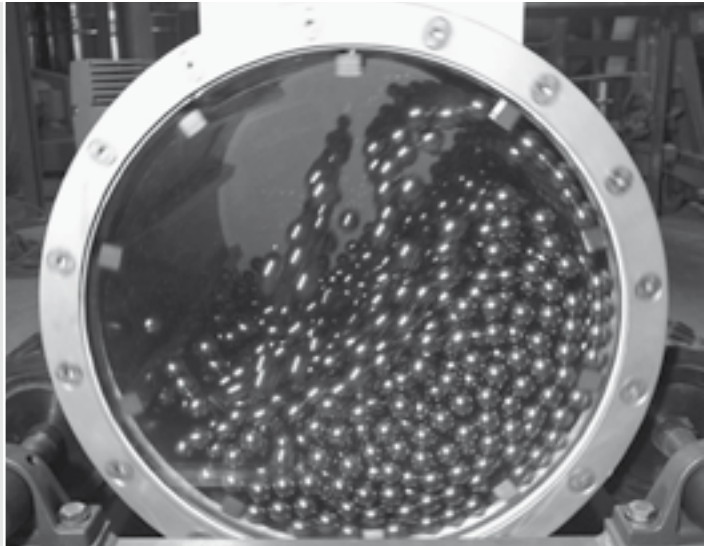


Bild I-11:
Momentaufnahme der Mahlkörperbewegung in der Demonstrationsmühle: Erkennbar ist eine Kataraktbewegung.



bewertung wird in folgenden Projektabschnitten ermittelt.

Modellierung der Mahlkörperbewegung in Kugelmöhlen

Der Elektroenergieaufwand für die Zementherstellung beträgt in Deutschland im Mittel ca. 110 kWh/t Zement, wobei etwa 38 % auf das Vermahlen von Klinker und Zuschlagstoffen zu Zement verwendet werden. Zur Zementmahlung werden überwiegend Kugelmöhlen eingesetzt. Trotz ihres vergleichsweise schlechteren Wirkungsgrads zeichnen sich diese neben hoher Betriebssicherheit vor allem durch eine breitere Korngrößenverteilung der ermahlenden Zemente aus. Aus diesem Grund ist für die Zementmahlung auch langfristig nicht mit einer vollständigen Substitution der Kugelmöhlen durch andere Mahlverfahren zu rechnen. Daher ist es zweckmäßig, sämtliche vorhandenen Optimierungspotenziale vollständig zu nutzen. Das Zusammen-

wirken der unterschiedlichen Betriebsparameter und ihr Einfluss auf die Mühlenfüllung können jedoch nur schwer abgeschätzt werden, da insbesondere das Mühleninnere messtechnisch nicht zugänglich ist. Die direkte Partikelsimulation stellt jedoch ein viel versprechendes Werkzeug zur energetischen Optimierung der Zementmahlung in Kugelmöhlen dar.

Seit Ende der 1990er Jahre existieren effiziente Methoden zur Berechnung und Visualisierung von Schüttgütern. Diese werden zu einem großen Teil unter dem Oberbegriff der „Diskrete Elemente Methode“ (kurz: DEM) zusammengefasst. Auf diese Weise lassen sich komplexe Schüttungen wie z. B. die Kugelfüllung einer Kugelmühle simulieren. Um die Prozesse im Innern von Kugelmöhlen eingehend untersuchen zu können, werden am FIZ ein zwei- und ein dreidimensionales Modell eingesetzt. **Bild I-10** zeigt exemplarisch

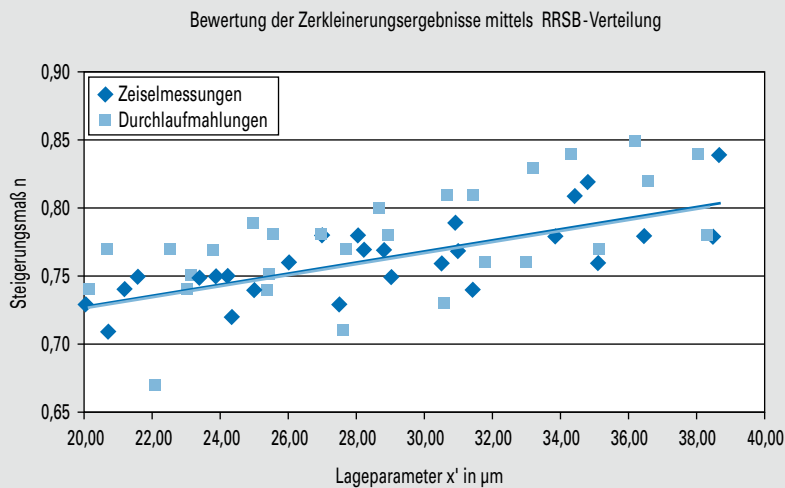


Bild I-12: Zerkleinerungsergebnisse nach Beanspruchung von Zementklinker im Testgerät nach Zeisel und in einer Durchlaufmühle

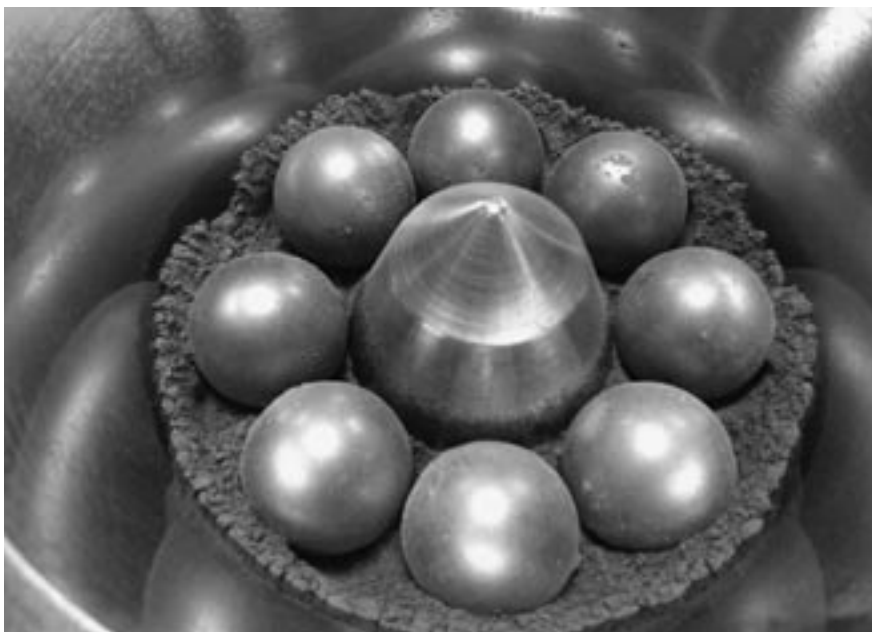


Bild I-13: Mahlschüssel der Prüfapparatur zur Bestimmung der Mahlbarkeit nach Zeisel

die Visualisierung von Ergebnissen des dreidimensionalen Modells. Die Simulation ermöglicht die Ermittlung von Größen, die in der Realität messtechnisch nicht erfasst werden können. Von besonderem Interesse sind dabei Geschwindigkeits- und Druckverteilungen, von denen auf den Zerkleinerungsvorgang geschlossen werden kann.

Simulationen erlauben zwar theoretisch den Zugang zu messtechnisch nicht erfassbaren Systemen, stellen aber immer eine Vereinfachung der Realität dar. Die Vorhersagequalität hängt daher entscheidend

von der exakten Validierung der verwendeten Modelle ab. Daher werden die Simulationsberechnungen (numerische Experimente) stets in Kombination mit umfangreichen Versuchen an einer mit Panzerglaswänden versehenen Demonstrationsmühle (**Bild I-11**) und der halbtechnischen Umlaufmahanlage des FIZ durchgeführt.

Neben der kinematischen Simulation der Mahlkörperfüllung ist auch die Zerkleinerung in Abhängigkeit von den Materialeigenschaften des Mahlguts entscheidend für eine wirkungsvolle Optimierung. Hierzu muss ein Zusammenhang zwischen berech-

neten Energieverteilungen und messbaren Zerkleinerungsergebnissen hergestellt werden. Daher wurden umfangreiche Untersuchungen zur Bestimmung von Materialkennwerten durchgeführt. Neben Bruchversuchen hat sich hauptsächlich der Mahlbarkeitstester nach Zeisel als geeignete Messapparatur herausgestellt. **Bild I-12** zeigt die Parameter der RRSB-Verteilung für Zementklinker, der unter verschiedenen Bedingungen im Mahlbarkeitstester nach Zeisel und in einer Kugelmühle im Durchlaufbetrieb beansprucht wurde. Im betrachteten Bereich ist allgemein eine gute Übereinstimmung der Zerkleinerungsergebnisse zu erkennen. Die stärkere Streuung der Werte, die während der Mahlung in der Kugelmühle erzielt wurden, ist durch den Einfluss verschiedener Betriebsparameter wie beispielsweise der Verweilzeit zu erklären. Diese Parameter werden durch systematische Versuchsreihen in diskontinuierlich arbeitenden Mühlen explizit untersucht. Es wurde ferner ein Verfahren zur präzisen Bestimmung des spezifischen Energieaufwands der Zerkleinerung im Testgerät nach Zeisel entwickelt. Hierbei erfolgt die Messung der Leistungsaufnahme durch eine Kraftmessdose anstelle eines Winkelmessers. Der Zerkleinerungsfortschritt wird durch Lasergranulometrie bestimmt.

Die ermittelten Ergebnisse bilden eine viel versprechende Basis für die vollständige Beschreibung der Zerkleinerung in Kugelmühlen. Aufbauend auf diesen ist geplant, ein Optimierungswerkzeug zur Steigerung der Energieeffizienz von Betriebsmühlen zu entwickeln.

Mahlbarkeitsprüfung nach Zeisel

Im Jahr 2010 wurde im Forschungsinstitut der Zementindustrie eine neue Prüfapparatur zur Bestimmung der Mahlbarkeit nach Zeisel installiert.

Die von der TU Clausthal nach Bauart der Tonindustrie hergestellte Prüfeinrichtung löste eine nach dem gleichen Prinzip arbeitende Apparatur aus den 1960er Jahren ab. Grundsätzlich besteht das Gerät aus einer Mahlschüssel, in der sieben Stahlkugeln durch einen Stempel in Rotation versetzt werden (**Bild I-13**). Die Kugeln zerkleinern das zugegebene Probenmaterial durch Druck und Reibung. Während des Tests werden die erzielte Feinheit und der dazu benötigte Energiebedarf ermittelt. Maßgebliche Unterschiede zwischen dem neuen und dem alten Gerät finden sich vor allem in der Messdatenerfassung. Gemessen wird nicht mehr der integrale Leistungswert durch einen Stromzähler, sondern der durch die Drehbewegung des Stempels entge-

einer Federkraft ausgelenkte Winkel, der durch eine vorhergehende Kalibrierung in das ausgelöste Drehmoment umgerechnet werden kann.

Um die Übereinstimmung der beiden Prüfeinrichtungen sicherzustellen, wurden zahlreiche Vergleichsmessungen durchgeführt. Darüber hinaus sind Untersuchungen bezüglich der Maschinenparameter und weiterer Einflussgrößen auf die Mahlbarkeit durchgeführt worden, wobei u. a. die Menge des Aufgabeguts, die Stempellast, der Einfluss der Kalibrierung sowie die Fraktion des Aufgabeguts variiert wurden. Des Weiteren wurden zahlreiche weitere Vergleichsmessungen bezüglich der Reproduzierbarkeit der Mahlbarkeitsbestimmungen nach Zeisel durchgeführt.

Im Rahmen der Forschungsarbeit zur Mahlkörperbewegung in Kugelmøhlen wurde zusätzlich ein weiteres Messverfahren erarbeitet, welches die durch den drehbar gelagerten Mahlteller entstehende Trägheit des Messverfahrens eliminiert. Hierzu wurde die Messung des Drehmoments mittels Winkelsensor durch einen Kraftsensor ersetzt. **Bild I-14** zeigt die Kraftmessdose, die über einen Hebelarm mit dem Mahlteller verbunden ist. Durch diese Maßnahme ist eine wesentlich höher auflösende Betrachtung des ausgelösten Drehmoments und damit des Leistungsbedarfs möglich. Die größtenteils trägheitsfreie Messmethode zeigt keinen durch die Feder beeinflussten gleichförmigen Drehmomentenverlauf mehr, sondern kurze, klar abgegrenzte Kraftstöße sowie Kräfte entgegen der Drehrichtung, die vorher nicht erfasst werden konnten. Eine große Zahl an Mahlbarkeitsprüfungen nach beiden Verfahren hat eine mögliche Abhängigkeit zwischen beiden Messverfahren ergeben, die noch näher zu betrachten ist. Insgesamt bieten die Ergebnisse vielfältige Ansatzpunkte für eine Weiterentwicklung des gesamten Verfahrens sowie für die Parameterbestimmung von Zerkleinerungsmodellen.

Energieeffizienz ■

Das Thema Energieeffizienz steht derzeit sowohl auf europäischer als auch auf nationaler Ebene auf der politischen Agenda. Bereits bei der Einführung des CO₂-Emissionshandels wurde die Verbesserung der Energieeffizienz als eine Maßnahme angeführt, um die CO₂-Emissionen der energieintensiven Industriebranchen zu senken. Mit den europäischen Strategien zur Ressourcen- sowie zur Energieeffizienz hat dies zusätzlich an Dynamik gewonnen. In Deutschland werden diese Strategien im



Bild I-14: Modifizierte Messung der Leistung mittels Kraftmessdose

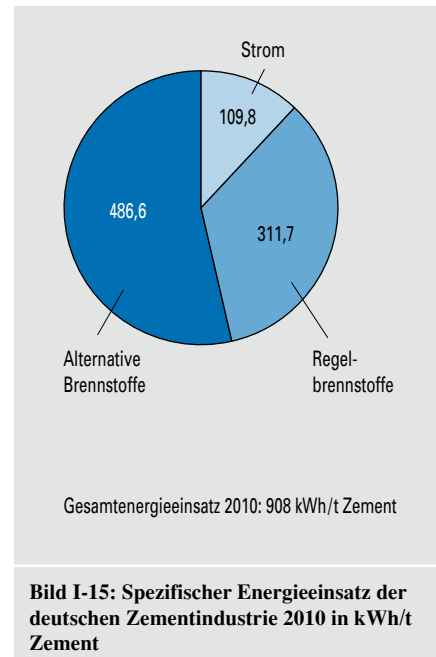


Bild I-15: Spezifischer Energieeinsatz der deutschen Zementindustrie 2010 in kWh/t Zement

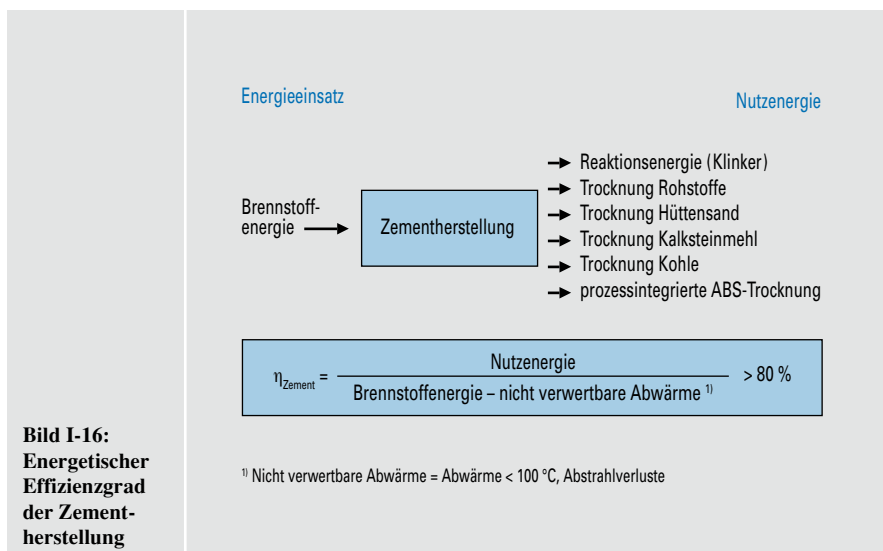


Bild I-16: Energetischer Effizienzgrad der Zementherstellung

Rahmen der Energiewende über verschiedene gesetzliche Vorhaben umgesetzt. So spielen die Energieeffizienz und die Einführung von Energiemanagementsystemen in der Industrie im Zusammenhang mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz sowie der Überarbeitung der Ökosteuerge setzung eine herausragende Rolle.

Für energieintensive Industriebranchen wie die Zementindustrie ist diese Diskussion nicht unproblematisch: Seit jeher wird der Energieeinsatz schon unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimiert, sodass die heute verbleibenden Potenziale sehr gering sind. So hat die „Cement Technology Roadmap“ der International Energy Agency (IEA) im Jahr 2010 bereits aufgezeigt, dass auf globaler Ebene die Energieeffizienz nur maximal 10 % zur CO₂-Minderung der globalen Zementindustrie

beitragen kann. Diese Einschätzung stimmt mit früheren Überlegungen des Forschungsinstituts überein, nachdem selbst beim Neubau aller Ofenanlagen in Deutschland „auf grüner Wiese“ nur maximal 7 % des Brennstoffenergiebedarfs der deutschen Drehofenanlagen eingespart werden könnte.

Bild I-15 zeigt die Verteilung des Energieeinsatzes in der deutschen Zementindustrie im Jahr 2011. Daraus geht hervor, dass – bezogen auf den Gesamtennergieeinsatz – die alternativen Brennstoffe in der Zwischenzeit deutlich mehr als 50 % zum Energiebedarf beitragen. Strom trägt dagegen nur etwa 12 % zum gesamten Energieeinsatz bei. Obwohl die energetische Optimierung von Teilanlagen wie der Zementmahlung gewisse Optimierungspotenziale im Hinblick auf den elektrischen Energie-

Tafel I-1: Anzahl und Kapazität der Öfen mit Betriebsgenehmigung in der Bundesrepublik Deutschland in den Jahren 2009 bis 2011

		Stand 01.01.2010			Stand 01.01.2011			Stand 01.01.2012		
		Anzahl	Kapazität		Anzahl	Kapazität		Anzahl	Kapazität	
			t/d	%		t/d	%		t/d	%
Öfen mit Zyklonvorwärmer		41	103 700	93	41	104 460	94	39	100 460	94
Öfen mit Rostvorwärmer		8	6 500	6	6	5 350	5	6	5 500	5
Schachtofen		8	1 200	1	8	1 200	1	8	1 200	1
Summe		57	111 400	100	55	111 010	100	53	107 160	100
mittlere Ofenkapazität in t/d	Drehöfen		2 249			2 336			2 355	
	Schachtofen		150			150			150	
Klinkerproduktion (Jahr)			(2009)			(2010)			(2011)	
in Mio. t/a			23,2			23,0			24,8	
Auslastung ¹⁾ in %			65			65			72	

¹⁾ angenommene Verfügbarkeit 320 d/a

bedarf aufweist, eignet sich dieser nur bedingt als Kenngröße für die Energieeffizienz. Grund hierfür ist, dass

- die steigenden Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von Zement und Beton in der Regel eine feinere Mahlung und damit einen höheren elektrischen Energiebedarf bei der Zementmahlung erfordern,
- die angestrebte Minderung der CO₂-Emissionen durch Verringerung des Klinker-Zement-Faktors den steigenden Einsatz von schwerer mahlbarem Hüttensand erfordert sowie
- die Verbesserung der Umweltsituation einen steigenden elektrischen Energiebedarf zur Abgasreinigung, z. B. bei der NO_x- oder der Staubminderung mit sich bringt.

Auf diesen Mehrbedarf haben die Zementunternehmen keinen direkten Zugriff.

Die wesentlichen Einflussgrößen auf die thermische Energieeffizienz bei der Zementherstellung sind vielfach untersucht worden. Die Anlagentechnik selbst, der Anlagenbetrieb, die Rohmaterial- und Brennstoffeigenschaften sowie nicht zuletzt der Klinker-Zement-Faktor spielen hier eine wesentliche Rolle. Bereits bei der Erarbeitung des BAT-Referenzdokuments für die Zementindustrie (BREF) im Zeitraum vor 2010 hatte das Forschungsinstitut der Zementindustrie auf den Unterschied zwischen Garantiewerten zur Energieeffizienz, die sich auf kurzzeitige Leistungstests beziehen, sowie den spezifischen Energiebedarf von Ofenanlagen im Jahresdurchschnitt, der Betriebsschwankungen, Ofenstillstände usw. umfasst, hingewiesen. Diesem war im aktuellen BREF Rechnung getragen worden, indem auf den BAT-Bereich

von 2900 bis 3300 MJ/t Klinker ein Aufschlag von 160 bis 320 MJ/t Klinker gemacht wurde, der diesen Unterschied berücksichtigt. Andererseits ist der spezifische Brennstoffenergiebedarf auch nicht in allen Fällen für den Vergleich von Ofenanlagen geeignet. Bezieht man z. B. die Nutzung von Abwärme in die Bewertung mit ein, sind gegebenenfalls Anlagenwirkungsgrade aussagekräftiger, in die die Nutzung von Abwärme z. B. zur Trocknung des Rohmaterials oder anderer Zementhauptbestandteile eingehen. Bezieht man darüber hinaus die Tatsache mit ein, dass alternative Brennstoffe prozessintegriert getrocknet werden, ergibt sich auf Basis der Daten für das Jahr 2010 ein Gesamteffizienzgrad für die deutsche Zementindustrie von über 80 % (**Bild I-16**). Dieser Effizienzgrad ist nicht direkt mit einem Wirkungsgrad zu vergleichen, berücksichtigt aber die spezifischen Randbedingungen der Branche einschließlich aller energetischen Nutzungen.

Energiebedarf ■

Ofenanlagen

Die genehmigte Ofenkapazität der deutschen Zementindustrie wurde im Berichtszeitraum von 111 400 t/d (2009) auf 107 160 t/d in 2011 verringert. Die Betriebsgenehmigungen von 4 Ofenanlagen sind ausgelaufen, wodurch die Gesamtzahl der genehmigten Ofenanlagen von 57 auf 53 Anlagen sank. Der überwiegende Anteil davon wird mit dem Trocken- bzw. Halbtrockenverfahren betrieben. Des Weiteren bestehen Genehmigungen für 8 Schachtofen. Die durchschnittliche Ofenkapazität der Drehöfen stieg leicht von 2 249 t/d in 2009 auf 2 355 t/d in 2011. **Tafel I-1** gibt einen Überblick über die verfügbaren

Ofenanlagen und deren Kapazitäten. So entfallen 98,9 % der genehmigten Gesamtkapazität auf Anlagen mit Zyklon- bzw. Rostvorwärmern. Der Anteil der Zyklonvorwärmanlagen ist in 2010 und 2011 mit 94 % (bezogen auf die Kapazität) nahezu konstant geblieben. Die Anzahl der Voralcalinieranlagen ist mit 12 gleich geblieben. Hiervon verfügen 9 Anlagen über eine Tertiärluftleitung. Voralcalinieranlagen repräsentieren aufgrund der im Vergleich größeren Ofenleistung mehr als ein Viertel der installierten genehmigten Klinkerkapazität der deutschen Zementwerke.

Die Auslastung der Ofenanlagen ist leicht von durch die Wirtschaftskrise bedingten niedrigen 65 % in 2009 und 2010 auf 72 % in 2011 angestiegen. Den Angaben zur Auslastung wurde eine angenommene Verfügbarkeit von 320 Tagen pro Jahr zugrunde gelegt.

Brennstoffenergiebedarf

Bei der Zementherstellung wird Brennstoffenergie im Wesentlichen für das Brennen des Zementklinkers aufgewendet. Geringe Mengen thermischer Energie werden für die Trocknung von weiteren Zementhauptbestandteilen, wie z. B. Hüttensand, eingesetzt. Zur Herstellung von Zementklinker mit seinen charakteristischen Eigenschaften werden die Rohstoffe, hauptsächlich Kalksteinmergel und Ton, bei Temperaturen von 1400 bis 1450 °C gebrannt. Aufgrund der Produktanforderungen, die einen Hochtemperaturprozess erforderlich machen, gehört die Zementindustrie zu den energieintensiven Branchen in Deutschland. Um die damit einhergehenden hohen Brennstoffenergiekosten zu senken, ist die Zementindustrie seit jeher bemüht, ihren Energiebedarf zu senken. Dies spiegelt sich in der Entwicklung des Brennstoffenergie-

einsatzes pro kg Klinker von 1950 bis 2011 (**Bild I-17**) wider. Ein kleiner temporärer Anstieg um 1987 ist durch das Hinzukommen der neuen Bundesländer bedingt. Seit etwa 1990 ist der Brennprozess verfahrenstechnisch so weit optimiert, dass der Brennstoffbedarf nahezu konstant blieb.

Erste Selbstverpflichtung zum Klimaschutz erfüllt

Im Jahr 1995 hat sich die deutsche Zementindustrie gemeinsam mit anderen energieintensiven Industriebranchen verpflichtet, einen Beitrag zur Verminderung der CO₂-Emissionen in Deutschland zu leisten. Diese erste Selbstverpflichtung der Zementindustrie umfasste eine Minderung des spezifischen Energiebedarfs im Zeitraum von 1987 bis 2008 um 20 %. Mit 2786 kJ/kg Zement hatte die Zementindustrie ihr Ziel im Zieljahr 2005 erreicht (**Bild I-18**). Im Jahr 2011 wurde eine Tonne Zement mit durchschnittlich 2759 kJ produziert.

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

Die deutsche Zementindustrie hat in den vergangenen Jahrzehnten ihren spezifischen Brennstoffenergiebedarf 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 gebracht wurden. Aber auch in den alten Bundesländern wurden einige Altanlagen durch neue Anlagen ersetzt. Daneben ist eine weitere wichtige Maßnahme zur Senkung des Brennstoffenergiebedarfs je Tonne Zement die Produktion von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen, was eine Reduktion des Klinkeranteils zur Folge hat.

Der absolute Brennstoffenergiebedarf der deutschen Zementindustrie sank von 1987 bis 2011 aufgrund der im betrachteten Zeitraum stark zurückgegangenen Zementproduktion um etwa ein Fünftel. Ein weiterer Grund für diese starke Verminderung war außerdem die Reduzierung des auf die Tonne bezogenen spezifischen thermischen Energiebedarfs um ca. 20 % im gleichen Zeitraum (**Bild I-18**). Während der spezifische thermische Energiebedarf der Drehofenanlagen in 1987 noch bei über

Bild I-17: Spezifischer Brennstoffenergiebedarf der deutschen Zementwerke (bis 1987 alte Bundesländer, danach gesamte Bundesrepublik)

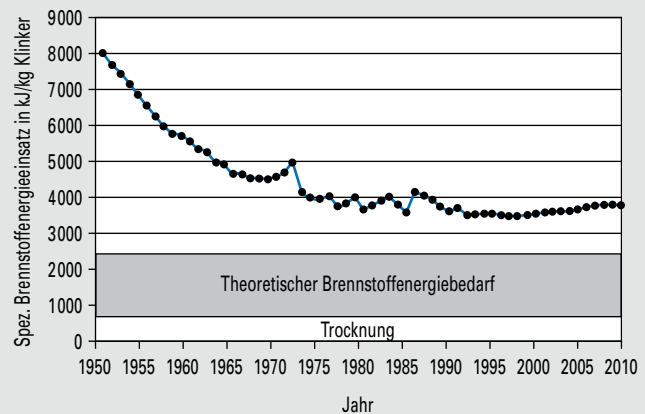


Bild I-18: Spezifischer thermischer Energiebedarf gemäß Selbstverpflichtung zum Klimaschutz

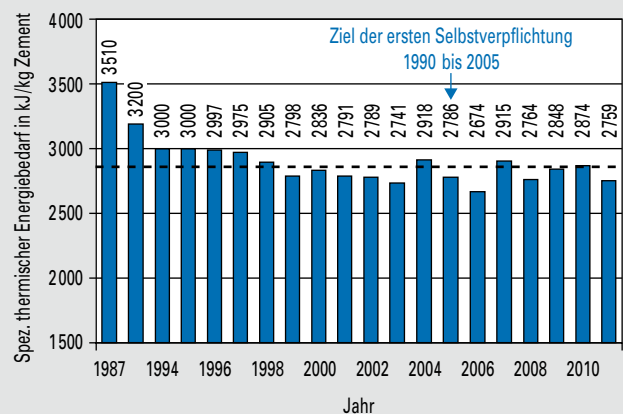
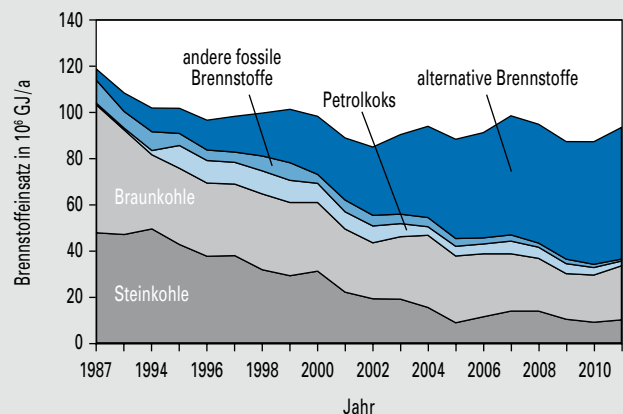


Bild I-19: Brennstoffeinsatz in der deutschen Zementindustrie seit 1987



Tafel I-2: Einsatz alternativer Brennstoffe in der deutschen Zementindustrie

alternative Brennstoffe	2009 in 1 000 t/a	2011 in 1 000 t/a
Reifen	245	286
Altöl	73	66
Fraktionen aus Industrie-/Gewerbeabfällen, davon:	1 652	1 643
Zellstoff, Papier und Pappe	175	63
Kunststoff	556	474
Verpackungen	1	0
Abfälle aus der Textilindustrie	9	10
Sonstige	911	1 096
Tiermehle und -fette	204	187
Aufbereitete Fraktionen aus Siedlungsabfällen	188	336
Altholz	13	8
Lösungsmittel	81	104
Bleicherde	0	0
Klärschlamm	263	304
Sonstige wie Ölschlamm oder Destillationsrückstände	78	125

satz von Altreifen stieg von 245 000 auf 286 000 t/a, die eingesetzte Altölmengende ist von 73 000 auf 66 000 t/a gesunken. Praktisch unverändert ist der Einsatz von Fraktionen aus Industrie- und Gewerbeabfällen mit 1 643 000 t/a (2011) gegenüber 1 652 000 t/a (2009). Dagegen lag der Einsatz aufbereiteter Fraktionen aus Siedlungsabfall 2011 mit 336 000 t/a deutlich höher als 2009 mit 188 000 t/a. Rückläufig ist der Einsatz von Tiermehl bzw. -fett aufgrund der konkurrierenden Verwendung in anderen Mitverbrennungsanlagen, wie z. B. Kraftwerken. Er hat sich von 204 000 t/a im Jahr 2009 auf 187 000 t/a im Jahr 2011 weiter verringert.

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. Die Entwicklung des spezifischen elektrischen Energieeinsatzes pro Tonne Zement der deutschen Zementwerke ist bis 1987 von einem langjährigen Anstieg auf Spitzenwerte um 110 kWh/t Zement geprägt (**Bild I-20**). Nach der Wiedervereinigung Deutschlands konnte dieser Trend umgekehrt werden, bis sich der Energieverbrauch ab etwa 2005 zwischen 100 und 102 kWh/t Zement stabilisierte. In den Jahren 2010 und 2011 lag der elektrische Energiebedarf wieder bei ca. 110 kWh/t Zement. Wesentlicher Grund hierfür dürfte der gestiegene Bedarf der Baustoffindustrie an fein aufgemahlenen leistungsstarken Zementen sein.

Bei Zementen mit weiteren Hauptbestandteilen neben Klinker, wie Hüttensand oder Kalkstein, hängt der Mahlergieaufwand v. a. von der Mahlbarkeit dieser Materialien ab. Im Vergleich zu Klinker ist z. B. Hüttensand schwerer, Kalkstein dagegen leichter mahlbar. Da diese Stoffe zur Erzielung gleicher Zementqualität feiner aufgemahlen werden müssen als Klinker, ist insgesamt eher ein höherer Mahlergieaufwand erforderlich. Andererseits wird der entsprechende elektrische Energiebedarf für die Herstellung des substituierten Klinkers (Rohmaterialaufbereitung, Brennprozess) eingespart. Der Einsatz energieeffizienter Mühltentypen, wie der Gutbett-Walzenmühle, hat sich in der Zementindustrie weitgehend durchgesetzt. Da die Gebrauchseigenschaften der Zemente aus diesen Mühlen jedoch nicht denen aus herkömmlichen Kugelmühlen entsprechen, ist in der Regel nach wie vor eine Nachmahlung in Kugelmühlen erforderlich. Somit kann das Potenzial der Energieeinsparung

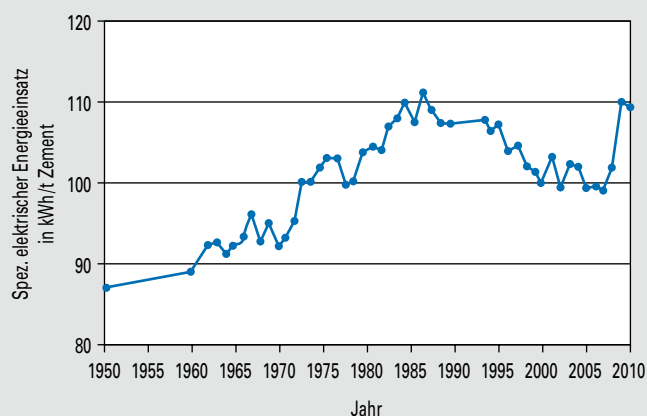


Bild I-20:
Spezifischer elektrischer Energiebedarf der deutschen Zementwerke (bis 1987 alte Bundesländer, danach gesamte Bundesrepublik)

3 500 kJ/kg Zement lag, betrug er im Jahr 2011 nur noch 2 759 kJ/kg Zement. Hierzu trug vor allem die Verminderung des Klinker-Zement-Faktors bei. Dieser betrug im Jahr 1987 86 % und wurde bis zum Jahr 2011 auf 73 % vermindert.

Brennstoffmix

Die Anteile der in der deutschen Zementindustrie eingesetzten unterschiedlichen Brennstoffe haben sich in den vergangenen Jahren weiterhin stetig verändert. Der gesamte Brennstoffeinsatz ist von 1987 bis 2011 u. a. wegen des starken Produktionsrückgangs von 119,9 Mio. GJ/a auf 94,4 Mio. GJ/a gesunken. Dies entspricht einer absoluten Verminderung von 21,2 %. Der Anteil der Alternativbrennstoffe stieg

im Berichtszeitraum weiter an (**Bild I-19**) und betrug im Jahr 2011 61,1 % im Vergleich zu 23,0 % im Jahr 1999. Durch den verstärkten Einsatz alternativer Brennstoffe wurde im Berichtszeitraum vorwiegend Braunkohle substituiert. Die Verbräuche anderer fossiler Brennstoffe (Heizöl EL, Heizöl S und Erdgas) liegen weiterhin auf sehr niedrigem Niveau. Sie werden vorwiegend zum Anfahren der Ofenanlagen verwendet.

Die Aufschlüsselung des Einsatzes alternativer Brennstoffe in den Jahren 2009 und 2011 zeigt, dass die Einsatzmenge von Altreifen wieder zugenommen hat, während der traditionelle Brennstoff Altöl weiter abgenommen hat (**Tafel I-2**). Der Ein-

weiterhin nicht in vollem Umfang nutzbar gemacht werden. Auch eine getrennte Aufmahlung der verschiedenen Hauptbestandteile und deren anschließende Mischung in Mischanlagen scheint im Rahmen der betriebsüblichen Möglichkeiten keine signifikante Minderung des Strombedarfs zu erlauben.

Eine zukunftsorientierte Möglichkeit zur Einsparung von Strom aus dem öffentlichen Netz bietet grundsätzlich die Nutzung von Abwärme aus dem Klinkerbrennprozess zur Verstromung. Eine erste Anlage zur Wärmenutzung von Ofenabgas ging Anfang 2012 in Deutschland in Betrieb. In einigen asiatischen Ländern, wo eine un-

sicherere Energieversorgung und/oder hohe Energiepreise Zementunternehmen häufig zur Eigenstromversorgung zwingen, ist bereits eine große Zahl insbesondere neuerer Zementofenanlagen mit dieser Technologie ausgestattet.

II

Umweltschutz bei der Zementherstellung

37



Foto: Dyckerhoff AG

Einblick in einen Wärmetauscharturm

Gesetzgebung ■

Neue Richtlinie über Industrieemissionen

Am 06.01.2011 ist die neue Richtlinie 2010/75 über Industrieemissionen (IED) in Kraft getreten. Die Richtlinie fasst insgesamt sieben bis dato einzeln vorliegende Umwelt-Richtlinien, darunter die Richtlinie über integrierte Vermeidung und Verminderung von Umweltverschmutzung (IVU-Richtlinie) sowie die Abfallverbrennungs-Richtlinie zusammen, die in dem fast dreijährigen Revisionsprozess grundlegend überarbeitet wurden. Ziel der Richtlinie ist die Einführung einheitlicher Umweltstandards in Europa und insbesondere eine bessere Umsetzung der so genannten Besten Verfügbaren Techniken (BVT). Damit sollen ein höheres Umweltschutzniveau in Europa erzielt und Wettbewerbsverzerrungen zwischen den einzelnen Mitgliedsstaaten verringert werden.

Bisher waren die Anforderungen an den Stand der Technik für Industrieanlagen in der IVU-Richtlinie aus dem Jahr 1996 geregelt. Allerdings hatte die europäische Kommission in der Vergangenheit immer wieder unterschiedliche Umweltstandards durch zahlreiche Ausnahmeregelungen und eine unterschiedliche Interpretation der IVU-Richtlinie in den EU-Mitgliedsstaaten festgestellt. Nur wenige Staaten, darunter Deutschland, hatten das EU-Recht vollständig umgesetzt.

Die erzielte Einigung sieht nun vor, dass eine Abweichung von den BVT zwar nach wie vor möglich ist, allerdings nur, wenn zusätzlich nachgewiesen wird, dass deren Anwendung zu unverhältnismäßig hohen Kosten im Vergleich zum ökologischen Nutzen führt. Genehmigungen müssen außerdem jetzt innerhalb von vier Jahren überprüft und aktualisiert werden und Genehmigungsaufgaben nach dem Erscheinen neuer BVT-Merkblätter entsprechend angepasst werden.

Die technischen Vorgaben für Abfallverbrennungs- und Abfallmitverbrennungsanlagen sind im Anhang VI der IED festgelegt. In diesem finden sich auch besondere Vorschriften für Drehöfen der Zementindustrie, in denen Abfälle als Alternativbrennstoffe eingesetzt werden. Durch gemeinsame Anstrengungen wurde erreicht, dass die Anforderungen an die europäische Zementindustrie nicht wesentlich verschärft wurden. Ein Vergleich der europäisch einzuhaltenden Grenzwerte mit den derzeit noch gültigen Vorgaben der 17. Bundes-Immissionsschutzverordnung

Tafel II-1: Internationale und nationale Emissionsgrenzwerte (Tagesmittelwerte) für Zementwerke mit Abfallmitverbrennung in mg/m³ (i. N.)

	Neue Richtlinie über Industrieemissionen	17. BImSchV	Vorschlag BMU: Novellierte 17. BImSchV ⁶⁾
Gesamtstaub	30	20 (14–10) ⁴⁾	10
HCl	10	10	10
HF	1	1	1
NO _x	500 ¹⁾	500 (320–200) ⁴⁾	200 ⁷⁾
NH ₃	–	–	30 ²⁾
Hg	0,05	0,03 ²⁾	0,02 ⁸⁾
ΣCd, Tl	0,05 (MPZ)	0,05 (MPZ)	0,05 (MPZ)
ΣSb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn	0,5 (MPZ)	0,5 (MPZ)	0,5 (MPZ)
Dioxine und Furane ng/m ³ (i. N.)	0,1 (MPZ)	0,1 (MPZ)	0,1 (MPZ)
SO ₂	50 ²⁾	50 ²⁾	50 ²⁾
TOC	10 ²⁾	10 ²⁾	10 ²⁾
CO	³⁾	⁵⁾	⁵⁾

MPZ: Mittelwert über die Probenahmezeit

¹⁾ Bis 01.01.2016 Ausnahmen bis maximal 800 mg/m³ (i. N.) für Lepolöfen und lange Öfen möglich

²⁾ Rohmaterialbedingte Ausnahmen möglich

³⁾ Emissionsgrenzwerte können von den zuständigen Behörden festgelegt werden

⁴⁾ Mischgrenzwertfestlegung durch die zuständige Behörde bei Abfalleinsatz > 60 %

⁵⁾ Zuständige Behörde hat einen Grenzwert festzulegen; rohmaterialbedingte Ausnahmen möglich

⁶⁾ Ab 01.01.2016

⁷⁾ Spätestens ab 01.06.2018

⁸⁾ Rohmaterialbedingte Ausnahmen möglich; Tagesmittelwert maximal 0,05 mg/m³ (i. N.)

(BImSchV) zeigt, dass sich zur Umsetzung der europäischen Vorgaben für den deutschen Verordnungsgeber grundsätzlich kein Handlungsbedarf ergibt. Bereits jetzt macht die 17. BImSchV für verschiedene Parameter (Staub, NO_x, Quecksilber) strengere Vorgaben, als diese zukünftig aufgrund der neuen europäischen Richtlinie einzuhalten sind (**Tafel II-1**).

Insgesamt zwei Jahre haben die Mitgliedsstaaten Zeit, die Vorgaben der Richtlinie bis Januar 2013 in nationales Recht umzusetzen. Dabei können die Mitgliedsstaaten auch strengere Vorgaben machen. So plant das deutsche Bundesumweltministerium (BMU) – unabhängig von den europarechtlichen Regelungen – die Anforderungen für Zementwerke, die Abfälle als Alternativbrennstoffe einsetzen, deutlich zu verschärfen. Für die Komponente Staub ist ein Wegfall der Mischungsrechnung vorgesehen. Zukünftig wird ein einheitlicher Grenzwert von 10 mg/m³ (i. N.) im Jahresmittel angestrebt. Auch für Stickstoffoxide (NO_x) soll die Mischungsrechnung vollständig gestrichen und ab Mitte 2018 ein einheitlicher Emissionsgrenzwert von 200 mg/m³ (i. N.) gelten. Derzeit entspricht ein solcher Wert noch nicht in jedem Fall dem Stand der Technik und stellt die Branche zukünftig vor große Herausforderungen.

Darüber hinaus sollen die Ammoniakemissionen auf 30 mg/m³ (i. N.) im Tagesmittel begrenzt werden. Weitreichende Konsequenzen würden sich auch durch die geplante Absenkung des Quecksilbergrenzwerts auf 0,02 mg/m³ (i. N.) ergeben. Ein solches Emissionsniveau könnte nicht in allen Werken umgesetzt werden.

Die Umsetzung der IED in Deutschland führt zu deutlich verschärften Anforderungen an die Zementindustrie und der wirtschaftliche Einsatz von Abfällen als alternative Brennstoffe im Zementwerk erfordert zukünftig große Anstrengungen.

Ersatzbrennstoffeinsatz in der deutschen Zementindustrie

Die Herstellung von Zement ist energie- und rohstoffintensiv. Eine Möglichkeit, den Verbrauch primärer Ressourcen nachhaltig zu mindern, besteht in der Verwertung geeigneter alternativer Materialien. Die deutsche Zementindustrie hat diese Möglichkeiten frühzeitig erkannt. Insbesondere bei dem Einsatz geeigneter alternativer Brennstoffe sind die deutschen Zementhersteller weltweit führend. In Deutschland sind im Jahr 2011 mehr als 60 % der benötigten Brennstoffenergie durch Ersatzbrennstoffe substituiert worden (**Bild II-1**). Das entspricht einem

Energieäquivalent von annähernd 2,4 Mio. Tonnen Steinkohle.

Der unbestritten hohe ökologische Nutzen einer sinnvollen Verwertung alternativer Materialien im Klinkerbrennprozess ist in den vergangenen Jahren in zahlreichen Studien unter Beweis gestellt worden. Nicht zuletzt geht auch die Einstufung der Verwertung geeigneter Materialien als eine dem Stand der Technik entsprechende Maßnahme im aktuellen BAT-Referenzdokument der Europäischen Kommission auf diese Erkenntnisse zurück.

Unabhängig davon ist es aus Sicht der Zementindustrie sinnvoll, die bisher überwiegend auf technischer Ebene geführte Argumentation hinsichtlich der positiven Eigenschaften der stofflichen und energetischen Nutzung von Abfällen im Produktionsprozess auch einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Vor diesem Hintergrund ist im Jahr 2011 durch den Ausschuss Umwelt und Verfahrenstechnik eine Arbeitsgruppe ins Leben gerufen worden. Durch die interdisziplinäre Besetzung dieser Gruppe ist gewährleistet, dass sowohl die stofflichen als auch die verfahrens- und umwelttechnischen Aspekte berücksichtigt werden können. Aufgabe dieser Arbeitsgruppe ist es auch, die in den vergangenen Jahren überaus erfolgreiche Entwicklung des Einsatzes alternativer Materialien zu bewerten und daraus geeignete Botschaften für die Öffentlichkeit abzuleiten.

Ein wesentlicher Bestandteil und eine spezifische Besonderheit der Verwertung alternativer Stoffe liegen beim Klinkerbrennen darin, dass sowohl der Energieinhalt als auch die stofflichen Komponenten der Einsatzmaterialien praktisch vollständig im Herstellungsprozess genutzt werden können. Bei sämtlichen anderen, überwiegend energetischen Verwertungsmaßnahmen, fallen im größeren Umfang Aschen oder Schlacken an, die im Anschluss weiter verwertet werden müssen (**Bild II-2**).

Weiterhin konnte die Arbeitsgruppe herausarbeiten, dass die energetische Nutzung von alternativen Brennstoffen den Vorteil bietet, diese Materialien prozessintegriert in den Drehrohröfen trocknen zu können. Dadurch entfällt der zusätzliche Einsatz in gegebenenfalls vorzuschaltenden Trocknungseinrichtungen. Die Energieeffizienz dieser integrierten Trocknung mit der simultanen energetischen Verwertung liegt bei weit oberhalb von 80 %.

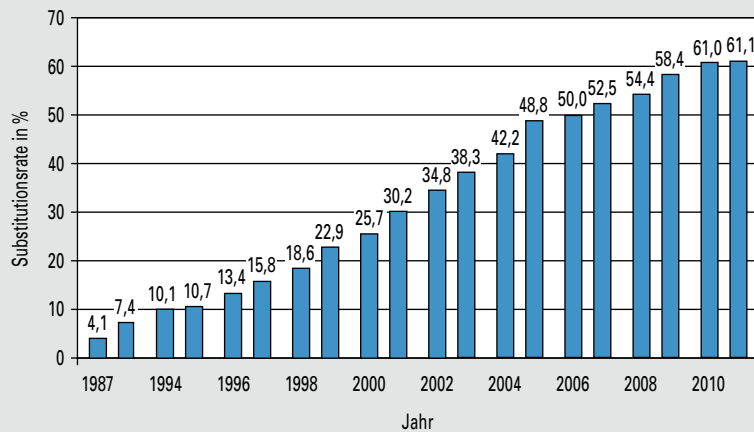


Bild II-1: Entwicklung des alternativen Brennstoffeinsatzes in der deutschen Zementindustrie

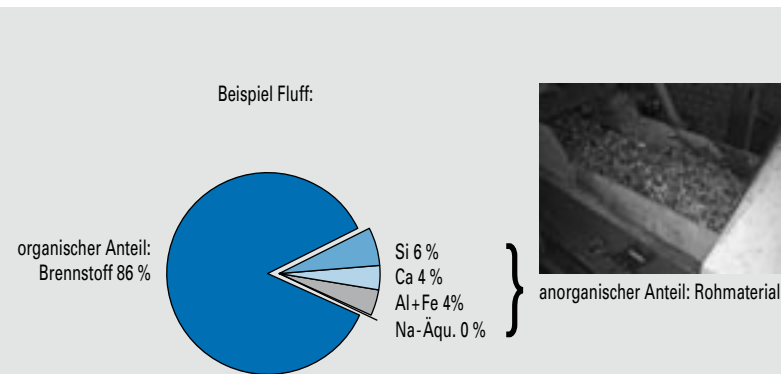


Bild II-2: Einsatzstoffe werden gezielt ausgewählt, umfangreich überwacht und vollständig stofflich sowie energetisch genutzt.

Auch im Hinblick auf die Nutzung der stofflichen Eigenschaften erreicht die Zementindustrie sehr hohe Wirkungsgrade. Diese liegen bezogen auf die insgesamt eingesetzten Mengen in einer Größenordnung von 99 %.

Dadurch, dass sämtliche Zementwerke, die alternative Brennstoffe einsetzen, in den vergangenen Jahren auch stets deren biogene Kohlenstoffanteile ermittelt haben, konnte darüber hinaus das CO₂-Einsparungspotenzial abgeschätzt werden, das durch die energetische Nutzung erreicht werden kann. Anhand der im Jahr 2010 im Rahmen der Emissionsberichterstattung erhaltenen Zahlen konnte dargelegt werden, dass die durchschnittliche CO₂-Minderung bei einer energetischen Nutzung von alternativen Brennstoffen im Klinkerbrennprozess bei 0,74 t CO₂/t eingesetztem Brennstoff lag. Auch das ist ein Wert, der ein-

drucksvoll den hohen ökologischen Nutzen des Einsatzes geeigneter alternativer Materialien im Klinkerbrennprozess darlegt.

Weiterhin beschäftigte sich die Arbeitsgruppe mit dem Phänomen, dass durch die Vorgabe unterschiedlichster Anforderungen speziell im Bereich des Umweltschutzes (zum Beispiel höhere Energieeffizienz, Minderung der CO₂-Emissionen, niedrigere Grenzwerte für NO_x) zunehmend Zielkonflikte auftreten. So führte beispielsweise die politische Forderung nach einer Absenkung der zementspezifischen CO₂-Emissionen zu einer vermehrten Substitution des energieintensiven Zwischenprodukts Klinker durch andere geeignete hydraulische Materialien bei der Zementherstellung. Um allerdings mit diesen CEM II-Zementen die gleichen Produkteigenschaften gewährleisten zu kön-

nen, müssen diese feiner gemahlen werden, was wiederum zu einem Anstieg des elektrischen Energieverbrauchs bei der Zementmahlung führt. Auch die in Deutschland besonders strikten Vorgaben im Zusammenhang mit der Minderung der Stickstoffoxidemissionen werden zwangsläufig zu einem höheren elektrischen Energieverbrauch der Anlagen führen, da gegebenenfalls zusätzliche Aggregate sowie in den meisten Fällen auch stärkere Ventilatoren zu installieren sind. Es herrschte Einigkeit in der Arbeitsgruppe, dass aufgrund des derzeit schon erreichten hohen Schutzniveaus für die Umwelt solche Zielkonflikte in Zukunft häufiger auftreten werden. An dieser Stelle sind auch die politischen Entscheidungsträger aufgefordert, im Zweifelsfall Entscheidungen zugunsten einer Zielvorgabe zu treffen.

Die Arbeitsgruppe wird ihre Tätigkeiten fortführen. Ziel ist es, nachdem die insgesamt positiven Eigenschaften des Einsatzes alternativer Roh- und Brennstoffe klar herausgearbeitet werden konnten, diese zum einen der Zementindustrie in Form eines Argumentationspapiers zur Verfügung zu stellen. Weiterhin ist vorgesehen, die wesentlichen Botschaften der Öffentlichkeit in einer Broschüre zugänglich zu machen. Aufgrund der modernen Anlagentechnik kann in jedem Fall gewährleistet werden, dass alternative Roh- und Brennstoffe in der Zementindustrie umweltverträglich und schadlos eingesetzt werden. Hinzu kommt, dass deren Einsatz oft sogar zu einer Verringerung von Umweltauswirkungen führt. Außerdem wird auf diese Weise der Verbrauch natürlicher Ressourcen deutlich vermindert.

Klimaschutz ■

Entwicklung der CO₂-Emissionen Brennstoffbedingte CO₂-Emissionen

Das Treibhauspotenzial der Emissionen der Zementindustrie wird praktisch ausschließlich durch Kohlendioxid bewirkt. Andere der im Kyoto-Protokoll genannten Treibhausgase (z. B. N₂O) treten bei der Zementherstellung nicht oder nur in extrem geringen Mengen auf. Beim Klinkerbrennprozess entstehen brennstoffspezifische CO₂-Emissionen zum einen durch die Umsetzung von Prozesswärme in den Drehrohröfen. Darüber hinaus wird Brennstoffenergie für die Trocknung anderer Hauptbestandteile des Zements, wie z. B. Hütensand, aufgewendet. Die spezifischen brennstoffbedingten CO₂-Emissionen der deutschen Zementindustrie sanken im Zeitraum 2008 bis 2011 von 0,117 auf 0,100 t

Tafel II-2: CO₂-Emissionen der deutschen Zementindustrie in den Jahren 2008 bis 2011

Jahr	Absolute CO ₂ -Emissionen in 10 ⁶ t/a				Spezifische CO ₂ -Emissionen in t CO ₂ /t Zement			
	2008	2009	2010	2011	2008	2009	2010	2011
thermisch bedingt ¹⁾	4,05	3,40	3,19	3,41	0,117	0,110	0,104	0,100
elektrisch bedingt	2,30	2,11	2,23	2,51	0,066	0,068	0,074	0,073
rohstoffbedingt	13,44	12,31	12,19	13,13	0,388	0,398	0,398	0,383
energiebedingt gesamt	6,35 19,79	5,51 17,82	5,42 17,61	5,92 19,05	0,183 0,571	0,178 0,575	0,178 0,575	0,173 0,556

¹⁾ Ohne alternative Brennstoffe aus Abfällen

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

Jahr	aus thermischem Energieverbrauch ¹⁾	aus elektrischem Energieverbrauch	aus Kalkstein- entsäuerung	gesamt
1990 ²⁾	0,280	0,072	0,450	0,802
1994	0,252	0,072	0,450	0,775
1995	0,254	0,071	0,451	0,776
1996	0,245	0,072	0,451	0,768
1997	0,231	0,070	0,453	0,754
1998	0,218	0,070	0,444	0,732
1999	0,199	0,068	0,427	0,694
2000	0,195	0,068	0,431	0,694
2001	0,179	0,067	0,415	0,661
2002	0,168	0,069	0,413	0,650
2003	0,156	0,067	0,401	0,624
2004	0,155	0,068	0,428	0,651
2005	0,132	0,068	0,406	0,606
2006	0,123	0,067	0,383	0,573
2007	0,128	0,067	0,419	0,614
2008	0,117	0,066	0,388	0,571
2009	0,110	0,068	0,398	0,575
2010	0,104	0,074	0,398	0,575
2011	0,100	0,073	0,383	0,556

¹⁾ Ohne alternative Brennstoffe aus Abfällen

²⁾ Basisjahr der freiwilligen Vereinbarung von 2000

CO₂/t Zement. In absoluten Zahlen bedeutete dies eine Verminderung von 4,05 auf 3,41 Mio. t CO₂/a. Hierin sind die CO₂-Emissionen aus dem Einsatz alternativer Brennstoffe – der Systematik der Selbstverpflichtung folgend – nicht berücksichtigt, da sie traditionelle und rein fossile Brennstoffe vollständig substituieren. Da die Abfälle ansonsten an anderer Stelle ihren Kohlenstoffgehalt zu CO₂ oder anderen Treibhausgasen freisetzen würden, führt der Einsatz von alternativen Brennstoffen insgesamt zu einer Verminderung der CO₂-Emissionen.

In dieser Bewertung der alternativen Brennstoffe besteht ein wesentlicher Unterschied zur Berichterstattung im Rahmen des Emissionshandels. Der Emissionshandel umfasst alle fossilen Brennstoffe sowie die fossilen Anteile der alternativen Brennstoffe. Nur die biogenen Anteile der Brennstoffe werden mit einem Emissionsfaktor von Null gerechnet. Eine Substitution der traditionellen fossilen Brennstoffe Braun- und Steinkohle durch andere Brennstoffe mit

niedrigeren spezifischen CO₂-Emissionen, wie z. B. Erdgas, ist aus Kostengründen nicht möglich. Da die Brennstoffkosten maßgeblich die Herstellkosten des Zements beeinflussen, gehen die Bestrebungen der Zementindustrie auch weiterhin dahin, fossile Brennstoffe verstärkt durch alternative Brennstoffe aus Abfällen zu ersetzen. Dabei spielt der Einsatz biogener Abfallbrennstoffe bzw. solcher Brennstoffe mit biogenen Anteilen eine zunehmend größere Rolle.

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 wird beim Emissionshandel stärker differenziert. Der elektrische Energieverbrauch macht etwa 10 % des gesamten Energieverbrauchs der Zementwerke aus. Als Primärenergie gerechnet ist der Anteil des elektrischen Energieverbrauchs – und der daraus resultierenden indirekten CO₂-

Emissionen – jedoch größer. Die durch den Stromverbrauch bedingte CO₂-Emission lag in den Jahren 2008 bis 2011 zwischen 0,066 und 0,073 t CO₂/t Zement. Hierbei ist der elektrische Energieverbrauch in absoluten und spezifischen Zahlen leicht gestiegen. Eine Eigenstromerzeugung findet in der deutschen Zementindustrie bisher nur in geringem Maße statt.

Rohstoffbedingte CO₂-Emissionen

Bei der Entsäuerung des für die Klinkerherstellung wichtigsten Rohstoffs Kalkstein (chemisch CaCO₃) wird CO₂ freigesetzt. Die je Tonne produziertem Klinker erzeugte rohstoffbedingte CO₂-Emission hängt von der Rohstoffzusammensetzung ab, variiert aber anlagenspezifisch nur in sehr geringem Maße. Sie beträgt in Deutschland ca. 0,53 t CO₂/t Klinker bzw. im Zeitraum 2008 bis 2011 zwischen 0,383 und 0,398 t CO₂/t Zement. Die gesamten rohstoffbedingten CO₂-Emissionen der deutschen Zementindustrie fielen aufgrund der rückläufigen Produktion in den Jahren 2009 und 2010 zunächst auf 12,2 Mio. t CO₂/a ab, um dann wieder einen Wert knapp über 13 Mio. t CO₂/a zu erreichen. Damit ergeben sich für den Berichtszeitraum die in **Tafel II-2** dargestellten spezifischen bzw. absoluten CO₂-Emissionen. Eine Verminderung der rohstoffbedingten CO₂-Emissionen ist – bezogen auf die Tonne Zement – nur in begrenztem Maße durch die verstärkte Herstellung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen möglich. Bezogen auf die Tonne Klinker ist eine Reduzierung praktisch nicht möglich.

Zusammenfassend ergeben sich damit die in **Tafel II-3** zusammengestellten spezifischen CO₂-Emissionen der deutschen Zementindustrie für den Zeitraum 1990 bis 2011. Das Basisjahr für die auf die spezifischen energiebedingten CO₂-Emissionen umgestellte Selbstverpflichtung der Zementindustrie ist das Jahr 1990.

Bestimmung von biogenem Kohlenstoff in Ersatzbrennstoffen

Nach wie vor werden zur Bestimmung des biogenen Anteils von CO₂-Emissionen bei der Klinkerproduktion die eingesetzten alternativen Brennstoffe auf ihren Gehalt an Biomasse untersucht. Die Methode der direkten Bestimmung aus dem Rauchgas befindet sich derzeit noch im Normungsprozess und hat bisher keine praktische Relevanz.

Im Gegensatz dazu ist für die unmittelbare Bestimmung des biogenen Anteils in Brennstoffen im Jahr 2011 die technische Spezifikation CEN/TS 15440 in die

DIN EN 15440 überführt worden. Ebenfalls in diese Norm integriert wurde die CEN/TS 15747, die die Bestimmung des biogenen Anteils mittels ¹⁴C-Methode beschreibt. Die Bestimmung des biogenen Anteils mittels selektivem Löseverfahren ist in Anhang A8 beschrieben und das ¹⁴C-Verfahren im Anhang C.

Wichtig für den CO₂-Emissionshandel ist, dass sowohl die selektive Lösemethode als auch die ¹⁴C-Methode als Bestimmungsverfahren für Feststoffe nun genormt sind und somit zur Ermittlung von Kenngrößen für den europäischen Treibhausgashandel angewendet werden dürfen. Hierbei gelten allerdings nach wie vor die gleichen Einschränkungen beim selektiven Löseverfahren wie auch schon in der vorherigen technischen Spezifikation beschrieben. So dürfen die Materialien, die über das selektive Lösen untersucht werden sollen, beispielsweise nicht mehr als 5 M.-% an Gummi enthalten. Auch Verunreinigungen mit fossilen Brennstoffen können zu fehlerhaften Ergebnissen führen. Generell kann in solchen Fällen eine nicht sachgerechte Anwendung sowohl zu Mehr- als auch zu Minderbefunden führen. Bei Materialien, die für beide Verfahren geeignet sind, lassen sich sehr gute Übereinstimmungen der Analyseergebnisse finden, sodass das – deutlich preisgünstigere – selektive Löseverfahren problemlos angewendet werden kann.

Die Durchführung der Analyse nach der selektiven Lösemethode sollte in jedem Fall von einem erfahrenen Labor durchgeführt werden. Auswertungen von Ringversuchen haben ergeben, dass bei der selektiven Lösemethode sehr genau gearbeitet werden muss, um vergleichbare und reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Die vorgegebenen Einwaagen und Chemikalienmengen bzw. -konzentrationen müssen genau eingehalten werden. Besonders wichtig ist hierbei auch, dass die Temperatur beim Lösevorgang auf Raumtemperatur gehalten wird. Die bei der Reaktion entstehende Wärme kann sonst dazu führen, dass zuviel gelöst wird und der ausgewiesene biogene Anteil zu gering wird.

Messung von biogenen CO₂-Emissionen in Drehofenabgasen

Im Rahmen des Emissionshandels stellt das Verhältnis von biogenen zu fossilen CO₂-Emissionen eine relevante Größe dar, die bei der CO₂-Berichterstattung auch von Drehofenanlagen der Zementindustrie angegeben wird. Für CO₂ aus biogenem Kohlenstoff wird per definitionem ein Emissionsfaktor von Null angesetzt, so-

dass für diesen Teil der CO₂-Emissionen keine CO₂-Zertifikate erworben werden müssen.

Der biogene Anteil in den (alternativen) Brennstoffen wird nach derzeitiger Praxis über Input-Analysen durchgeführt. Dabei wird der Anteil der biogenen CO₂-Emissionen auf Basis der Brennstoffmassenströme sowie einer regelmäßigen Bestimmung des biogenen Kohlenstoffanteils in den verwendeten Brennstoffen ermittelt. Wegen der jährlichen Berichtspflicht beim Treibhausgasemissionshandel ist jeweils ein Zeitraum von zwölf Monaten zu betrachten. Während die Brennstoffmassenströme anhand der Daten der Brennstoffwaagen vergleichsweise einfach zu erfassen sind, werden die Anteile an biogenem Kohlenstoff je nach Brennstoffart unterschiedlich ermittelt. Für einige alternative Brennstoffe wie Altreifen, Klärschlamm oder Tiermehl wurden in Abstimmung mit den zuständigen Behörden Standardwerte für den Anteil an biogenem Kohlenstoff festgelegt, die ohne weitere Analysen verwendet werden dürfen. Dagegen müssen für andere alternative Brennstoffe, wie z. B. Fraktionen aus Industrie- und Gewerbeabfällen oder aufbereitete Fraktionen aus Siedlungsabfällen, regelmäßige Analysen zur Bestimmung des biogenen Kohlenstoffanteils durchgeführt werden.

Da die Zusammensetzung dieser alternativen Brennstoffe schwanken kann und die Proben meist großen Haufwerken entnommen werden, ist die exakte Bestimmung der biogenen CO₂-Emissionen als Monats- bzw. Jahresfracht mit einem entsprechend hohen Untersuchungsaufwand verbunden.

Als alternative Methode befindet sich ein Verfahren in der Entwicklung, bei dem der Anteil der biogenen CO₂-Emissionen über eine Langzeitmessung im Kamin der Drehofenanlage bestimmt werden soll. Es handelt sich dabei um eine 3-stufige Vorgehensweise:

1. Repräsentative Langzeitbeprobung der CO₂-Emissionen im Kamin
2. Analytische Bestimmung des Verhältnisses zwischen biogenem und fossilem CO₂ in der Sammelprobe
3. Kontinuierliche Messung des Abgasvolumenstroms und der Gesamt-CO₂-Konzentration zur Berechnung der biogenen CO₂-Emissionsfracht

Der Prototyp eines für diese Messung geeigneten Langzeitprobenehmers ist zurzeit am Kamin eines Zementwerks zu Ver-



Bild II-3: Langzeitprobennehmer zur Bestimmung der biogenen CO₂-Emissionen im Abgas

suchszwecken installiert. Die Probenahme erfolgt geschwindigkeitsproportional über eine Entnahmesonde mit mehreren über den Kaminquerschnitt verteilten Messöffnungen. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass die Messgasentnahme sowohl eine möglicherweise inhomogene Verteilung der CO₂-Konzentration im Kamin als auch schwankende Gasgeschwindigkeiten aufgrund wechselnder Betriebszustände sowie unterschiedlicher Anlagenleistung erfasst.

Das System ist derart ausgelegt, dass die Gasprobe über einen Zeitraum von bis zu vier Wochen auf einem zur Abscheidung von CO₂ geeigneten Absorptionsmaterial gesammelt wird. Hierzu können verschiedene Materialien verwendet werden, wobei Feststoffabsorber aufgrund der einfacheren Handhabung zu bevorzugen sind. Bei den aktuellen Versuchen wird die Eignung von Natronkalk erprobt, der eine effektive CO₂-Abscheidung gewährleistet. Die Langzeitprobenahme wird dadurch ermöglicht, dass über die Messgassonde zunächst ein Hauptgasstrom von ca. 2,5 l/min abgezogen wird, um die Verweilzeiten in dem SONDENSYSTEM möglichst kurz zu halten. Aus diesem Hauptgasstrom wird anschließend einen Teilvolumenstrom von ca. 10 ml/min abgezweigt und über den Feststoffabsorber geleitet.

Da bei Beschädigung der Probe oder fehlerhafter Analyse im Labor unmittelbar ein kompletter Langzeitmittelwert (z. B. für einen Monat) verloren gehen würde, erfolgt zur Absicherung der Ergebnisse eine Dop-



Bild II-4: Laborapparatur zur Aufbereitung der Feststoffabsorber für die nachfolgende Analyse

pelbestimmung auf zwei im Wechsel von 60 s beaufschlagte Feststoffabsorber. In **Bild II-3** ist der Prototyp des Langzeitprobennehmers dargestellt.

Die Dauer der Probenahme kann je nach Anforderung über weite Zeiträume variiert werden. Möglich sind Probenahmezeiten von einem Tag, einer Woche oder einem Monat. Nach Beendigung der Probenahme werden die Feststoffabsorber gegen neue Sammelkartuschen ausgetauscht. Hierbei handelt es sich um eine sehr einfache Prozedur, die prinzipiell nach einer entsprechenden Einweisung auch von betriebseigenem Personal durchgeführt werden könnte.

Vor der Analyse werden die Proben im Labor in geeigneter Weise aufbereitet (**Bild II-4**). Dazu wird die Sammelprobe zunächst mit Phosphorsäure versetzt, das am Natronkalk gebundene CO₂ vollständig in die Gasphase überführt und anschließend in einem Behälter aufgefangen. Auf diese Weise erhält man eine unverdünnte, homogene Durchschnittsprobe des im Probenahmezeitraum von der Drehofenanlage emittierten Kohlendioxids. Eine Teilmenge dieser Probe wird dann der Analyse zugeführt.

Für die Analyse stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung, bei denen jeweils der Anteil des ¹⁴C-Isotops in der Probenmatrix bestimmt wird. Folgende Methoden stehen zur Verfügung:

- AMS (Beschleuniger-Massenspektrometer)

- BI (Beta-Ionisations-Messung)
- LSC (Liquid Scintillation counting)

Die Methoden unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Genauigkeit und auch im Hinblick auf die mit der Analyse verbundenen Kosten. Da die Gehalte an biogenem CO₂ im Abgas von Drehofenanlagen im Bereich von ca. 8 bis 15 % des Gesamt-CO₂ liegen, sind vergleichsweise hohe Anforderungen an die Messunsicherheit des Analyseverfahrens zu stellen. Mittels AMS und Beta-Ionisation liegt die Messunsicherheit des Analyseverfahrens deutlich unter ±1 %, für das Liquid Scintillation Counting wird dagegen ein Wert von ±5 % angegeben.

Diese Angaben zeigen, dass der Einsatz der LSC-Technik für diese Art der Untersuchung an Drehofenanlagen der Zementindustrie derzeit noch nicht ausreichend genau ist. Da es sich hierbei aber aus Kostengründen um das am weitesten verbreitete Analyseverfahren handelt, liegt ein Schwerpunkt der aktuellen Entwicklungen auf einer Optimierung dieser Analysenmethode, mit dem Ziel, die Messunsicherheit zu verringern, um möglicherweise als Alternative zur AMS-Messung oder β-Ionisation herangezogen werden zu können.

Die Ergebnisse der ¹⁴C-Analyse werden in „percentage modern carbon“ (pmC) angegeben und können unter Berücksichtigung eines (jahresabhängigen) Referenzwerts in „% biogener Kohlenstoff“ umgerechnet werden. Zur abschließenden Ermittlung der biogenen Emissionsfracht müssen als weitere Messgrößen der Abgasvolumenstrom

sowie die Gesamt-CO₂-Konzentration kontinuierlich und mit ausreichender Genauigkeit gemessen werden. Um die im Emissionshandel geforderten Genauigkeiten erfüllen zu können, sind hier ebenfalls weitere Verbesserungen der Messtechnik erforderlich.

Die laufenden Arbeiten orientieren sich an einem derzeit im Entwurf vorliegenden ISO Standard prEN 13833 Stationary Source Emissions – Determination of the Ratio of Biomass (Biogenic) and Fossil-derived Carbon Dioxide – Radiocarbon Sampling and Determination. Dieses Normungsverfahren wird voraussichtlich in den kommenden Jahren abgeschlossen werden.

Emissionshandel

Europäische Klimapolitik

Am 23.04.2009 hat die Europäische Union ein Maßnahmenpaket verabschiedet, mit dem ihre Klimapolitik für den Zeitraum 2013 bis 2020 festgelegt wird. Das wesentliche Instrument für die Industrie bleibt der CO₂-Emissionshandel. Für diesen ist zunächst das Minderungsziel von -21 % (Cap, 2005 bis 2020) vorgegeben. Unternehmen in Industriebranchen konnten bis 23.01.2012 eine kostenlose Zuteilung an CO₂-Zertifikaten gemäß einheitlicher Benchmarks beantragen. Für Anlagen zur Produktion von Grauzementklinker beträgt dieser Wert 766 kg CO₂/t Klinker.

Nach einem Produktionsrückgang in den Jahren der Wirtschaftskrise und einem deutlichen Preisverfall der CO₂-Zertifikate im Emissionshandel im Jahr 2011 wird derzeit von Seiten der europäischen Kommission über eine nachträgliche Reduzierung der Menge an versteigerten CO₂-Zertifikaten (Set-aside) oder eine mögliche Verschärfung des Minderungsziels (Cap) diskutiert. Die im Maßnahmenpaket enthaltene Richtlinie zur Förderung erneuerbarer Energieträger hat dabei mit teilweise überschneidenden Zielvorgaben ebenfalls Einfluss auf eine Entwicklung hin zu niedrigeren CO₂-Preisen. Die Richtlinie zur geologischen Speicherung von Kohlendioxid (CCS) führte bisher nicht zur erhofften Entwicklung und Einführung der CCS-Technologie. Ursache hierfür ist sicherlich neben dem Fehlen tatsächlich erprobter Abscheidetechniken insbesondere auch die mangelnde öffentliche Akzeptanz für eine unterirdische Lagerung des abgeschiedenen Kohlendioxids.

Internationale UN-Klimaverhandlungen für ein Kyoto-Nachfolgeabkommen haben bisher keine Fortschreibung verbindlicher Klimaschutzziele außerhalb Europas erge-

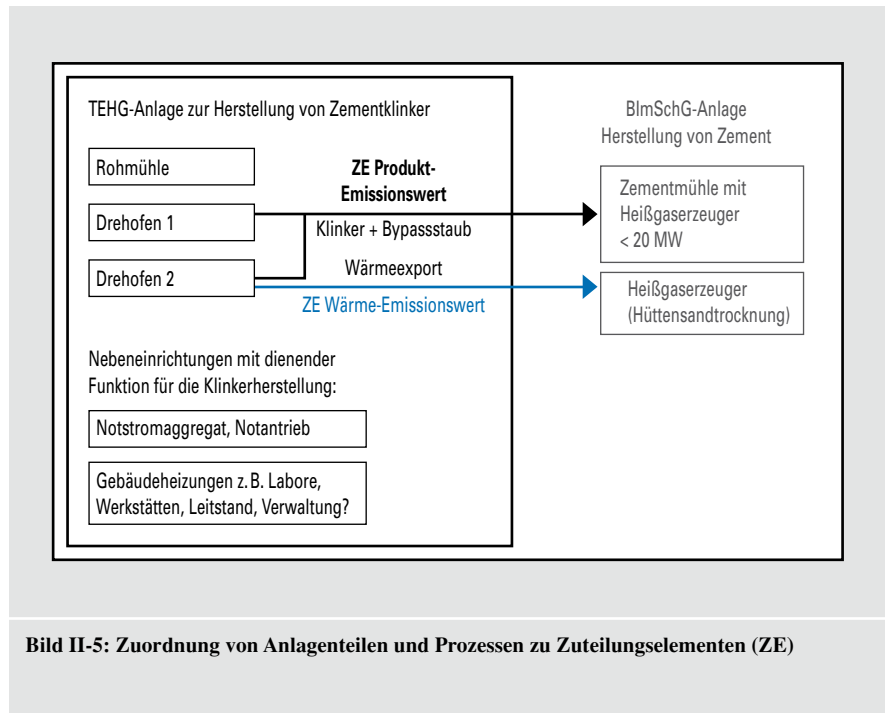


Bild II-5: Zuordnung von Anlagenteilen und Prozessen zu Zuteilungselementen (ZE)

ben. Unabhängig davon werden in der EU unter dem Titel „Roadmap 2050“ weiterführende Strategien für das Erreichen langfristiger Minderungsziele und für eine wettbewerbsfähige und kohlenstoffarme Wirtschaft diskutiert.

Emissionshandel 2013 bis 2020

Die 3. Periode des EU-Emissionshandels (2013 bis 2020) hat mit zahlreichen Neuerungen mit dem Zuteilungsverfahren für kostenlose Emissionsrechte begonnen. Für die Umsetzung der EU-Emissionshandelsrichtlinie gilt in Deutschland die am 27.07.2011 in Kraft getretene Novelle des Treibhausgasemissionshandelsgesetzes (TEHG) und die Zuteilungsverordnung (ZuV 2020). Die Antragstellung durch die Anlagenbetreiber wurde am 23.01.2012 abgeschlossen. Die DEHSt hat nach Auswertung aller Anträge eine Liste der geprüften vorläufigen Zuteilungen erstellt und diese an die Europäische Kommission übermittelt. Nach einer Prüfung aller aus den europäischen Mitgliedsstaaten eingereichten Zahlen wird dort sektorübergreifend ein Korrekturfaktor ermittelt, der ggf. zu einer jährlich fortschreitenden Kürzung der Zuteilung führt. Auf dieser Basis erstellt die DEHSt voraussichtlich Ende 2012 die endgültigen Zuteilungsbescheide für jede Anlage.

Um das EU-weite Emissionsminderungsziel bis 2020 zu erreichen, ist die Anzahl der Zertifikate EU-weit begrenzt und wird jährlich um 1,74 % verringert. Zwar gilt

dieser Minderungsfaktor nicht unmittelbar für die Anlagen, denen Zertifikate kostenfrei auf Basis von Benchmarks zugeteilt werden. Dennoch führen anspruchsvolle Benchmarks bei der Zuteilung und mögliche sektorübergreifende Kürzungen der Zuteilung dazu, dass zukünftig mehr Zertifikate ersteigert werden müssen.

Die Zuteilung von kostenlosen Zertifikaten erfolgt ab 2013 für Industrieanlagen auf der Grundlage von produktspezifischen Emissionswerten (Benchmarks). Hierbei ist die Zuordnung von Anlagenteilen bzw. Prozessen zu mehreren Zuteilungselementen erforderlich. Ausschlaggebend ist ihre Zugehörigkeit zu einem Produkt-Emissionswert für Klinker oder als so genannte Fallback-Lösung zusätzlich zu Wärme- oder Brennstoff-Emissionswerten. **Bild II-5** stellt diese Zuordnungen in einem Zementwerk dar. Für die Zuteilung nach dem Produkt-Emissionswert ist die Klinkerproduktion mit der Menge an entsäuertem Bypassstaub maßgeblich. Weiterhin kann es für die Nutzung von Abwärme aus der Klinkerproduktion z.B. in Hüttensandtrocknern eine Zuteilung auf Grundlage eines Wärme-Emissionswerts geben, da Heißgaserzeuger in der Zementmahlung nicht der TEHG-Anlage Klinker zugeordnet werden. Der Betreiber war frei bei der Wahl der Basisperiode (2005 bis 2008 oder 2009 bis 2010) zur Bestimmung der maßgeblichen Aktivitätsrate aus den Klinkerproduktionsdaten für die Zuteilung an Bestandsanlagen.

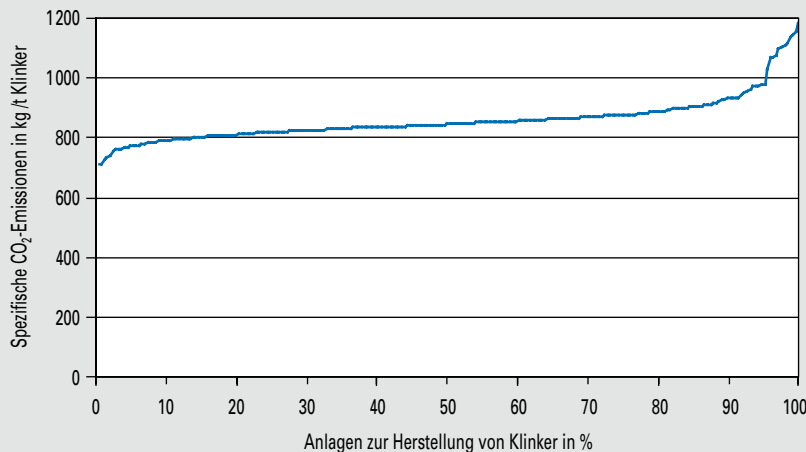


Bild II-6: Spezifische CO₂-Emissionen für die Herstellung von Grauzementklinker in Europa (EU 27 und Norwegen) in den Jahren 2007 und 2008

Besondere Regeln gelten für Kapazitätsänderungen. Diese sind hinsichtlich einer technischen Änderung und der tatsächlich erreichten Produktionsmengen auf ihre Wesentlichkeit hin zu prüfen. Gegenüber der BImSchG-Genehmigung ist für die Zuteilung ein geänderter Kapazitätsbegriff relevant. Demnach wird die Kapazität aus dem Durchschnitt der zwei höchsten, auf 30 Tage normierten Monatsproduktionen eines bestimmten Zeitraums bestimmt. Der so ermittelte Wert wird hochgerechnet auf ein Jahr.

Benchmark-Festlegung

Im CO₂-Emissionshandelssystem ist die Zuteilung der Emissionsberechtigungen ab dem Jahr 2013 europaweit einheitlich geregelt. Die kostenfreie Zuteilung der Zertifikate an Unternehmen der produzierenden Industrie basiert dabei auf den Produktionszahlen der Basisjahre 2005 bis 2008 bzw. 2009 bis 2010 sowie auf produktspezifischen CO₂-Benchmarks. Für Klinker sind dies 766 kg CO₂/t Grauzementklinker beziehungsweise 987 kg CO₂/t Weißzementklinker.

Abgeleitet wurden diese anspruchsvollen Benchmarks auf der Grundlage der CO₂-Emissionen der 10 % effizientesten Anlagen in Europa in den Jahren 2007 und 2008 (vgl. **Bild II-6**). Gegenüber den mittleren spezifischen CO₂-Emissionen der europäischen Zementindustrie in den gleichen Jahren bedeutet dies eine Minderung der kostenfreien Zuteilung von 11 % bezogen auf alle Anlagen. Eine wesentliche Mög-

lichkeit, die spezifischen CO₂-Emissionen bei der Klinkerproduktion zu mindern und somit diese Minderzuteilung zumindest teilweise zu kompensieren, besteht im Einsatz geeigneter alternativer Brennstoffe mit entsprechenden Anteilen an biogenem Kohlenstoff. Noch anspruchsvoller wird die Berichterstattung ab dem Jahr 2013 auch dadurch, dass die EU-Regeln für die Zuteilung u. a. bestimmte Gebäudeheizungen mit in den produktbezogenen Benchmark einrechnen. Für den Betrieb dieser geringen zusätzlichen Emissionsquellen müssen dann ab 2013 voraussichtlich ebenfalls Zertifikate abgegeben werden.

Carbon Leakage Auswertung

Der Begriff „Carbon Leakage“ bezeichnet eine durch den EU-Emissionshandel hervorgerufene Verlagerung von industrieller Produktion und damit verbundenen CO₂-Emissionen in Länder außerhalb des EU-ETS. Dies ist aus mehreren Gründen problematisch:

1. CO₂-Emissionen entweichen aus der Kontrolle des Emissionshandelssystems, das dadurch seine Effektivität verliert.
2. Es wird ein spezieller Wettbewerbsnachteil für Industriestandorte in Europa aufgebaut und wirtschaftliche Wertschöpfung aus Europa hinaus verlagert.
3. Eine Produktionsverlagerung in Länder außerhalb des Emissionshandelssystems ist oft weniger CO₂-effizient, da zusätzliche CO₂-Emissionen beim Transport und Import der Produkte nach Europa anfallen.

Um solche Carbon-Leakage-Effekte zu vermeiden, hat die EU-Kommission im Jahr 2009 eine Liste von energieintensiven Industrie-Sektoren erstellt, die Zertifikate kostenfrei zugeteilt bekommen. Diese Liste soll alle fünf Jahre überprüft werden. Laut EU-Richtlinie besteht ein Risiko der Verlagerung von CO₂-Emissionen, wenn die Kosten der zu erwerbenden CO₂-Zertifikate einen Anstieg der Produktionskosten um min. 5 % der Bruttowertschöpfung bewirken und wenn die Handelsintensität mit Nicht-EU-ETS-Ländern mehr als 10 % der Gesamtgröße des Gemeinschaftsmarkts beträgt. Alternativ wird ein Risiko der Verlagerung auch dann gesehen, wenn die CO₂-Zertifikatekosten einen besonders hohen Produktionskostenanstieg von mindestens 30 % der Bruttowertschöpfung bewirken oder die Handelsintensität mit Drittstaaten 30 % übersteigt.

Die Zementindustrie befindet sich auf der Liste der gefährdeten Industriesektoren für Carbon Leakage, da sie das zweite Kriterium (Produktionskostenanstieg von min. 30 %) erfüllt.

In einer durch das CEMBUREAU beauftragten Studie aus dem Jahr 2008 wurde die Carbon-Leakage-Gefährdung der europäischen Zementindustrie bei einer Vollversteigerung von Zertifikaten dargestellt. Hiernach wäre 81 % der Klinkerproduktion von Produktionsverlagerung und Import von Klinker aus Nicht-EU-ETS-Ländern bei einem Zertifikatspreis von 25 €/t CO₂ bedroht.

Eine Neubewertung des CL-Status und damit der kostenfreien Benchmark-Zuteilung an bestimmte Industriesektoren soll im Jahr 2014 erfolgen. Für eine aktualisierte Bewertung der Carbon-Leakage-Gefährdung der europäischen Zementindustrie für die nächste 5-Jahres-Periode ab 2015 findet im CEMBUREAU eine erneute Analyse der beeinflussenden Faktoren statt.

CO₂-Berichterstattung

Die Unternehmen der Zementindustrie sind im Rahmen des EU-Emissionshandels (EU-ETS) zu einem jährlichen Bericht über ihre direkten CO₂-Emissionen aus Roh- und Brennstoffen in der Klinkerproduktion verpflichtet. Neben den dafür geltenden Vorgaben für die Berichterstattung steht der Zementindustrie mit dem Cement CO₂ and Energy Protocol (CSI-Protocol) ein weltweit angewendetes Werkzeug zur Verfügung, mit dem direkte und indirekte CO₂-Emissionen aus Stromverbrauch und Klinkerzukaufen in der Zementherstellung auf freiwilliger Basis bestimmt werden

können. Beide Methoden erfordern die Kenntnis der relevanten Stoffströme in einem Zementwerk (vgl. Bild II-7), der Einsatz- und Produktionsmengen sowie der zugehörigen Stoffparameter wie Heizwert und Emissionsfaktor.

Cement CO₂ and Energy Protocol

Das CSI-Protocol wurde von der Cement Sustainability Initiative (CSI) des World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) unter Mitwirkung seiner Mitgliedsunternehmen und des VDZ entwickelt, u. a. mit dem Ziel, die Berichterstattung von CO₂-Emissionen mit den EU-Regelungen zu harmonisieren. Die Version 3.04 ist seit Dezember 2011 online verfügbar (www.cement-co2-protocol.org). Wesentliche Änderungen betreffen z. B. die Berücksichtigung biogener Anteile der CO₂-Emissionen aus alternativen Brennstoffen und neu aufgenommene Methoden für die Berücksichtigung von Stromerzeugung im Zementwerk aus Abwärme oder separaten Kraftwerken. Erweitert wurden die Bestimmungsmethoden für prozessspezifische CO₂-Emissionen aus der Entsäuerung des Rohmaterials, wahlweise nach der Material-Input- oder -Output-Methode. Bei der Input-Methode werden das Rohmehl (Ofenaufgabe) und weitere Rohmaterialien (Ofeneinlauf) betrachtet. Dagegen werden bei der Output-Methode der produzierte Klinker und der organische Kohlenstoffgehalt der Rohmaterialien herangezogen. Beide Ansätze berücksichtigen mögliche CO₂-Emissionen aus der Entsäuerung von Stäuben, die aus dem Klinkerbrennprozess ausgeschleust werden (cement kiln dust, CKD und Bypassstaub). Weiterhin werden sämtliche fossile sowie alternative Ofen- und weitere Brennstoffströme (z. B. für Trockner, Heizungen, Werksfahrzeuge, Anlagen zur Stromproduktion) einbezogen.

Anhand des CSI-Protocols werden spezifische Emissionsdaten im Rahmen des CSI-Getting The Numbers Right (GNR) Projekts gesammelt zum Aufbau eines weltweiten CO₂- und Energie-Informationssystems für die Klinker- und Zementproduktion. Der im Juni 2009 veröffentlichte GNR-Bericht deckt die Jahre 1990 bis 2006 ab (Daten bis 2010: www.wbcscement.org/co2data).

Dieses CSI-Protocol dient derzeit auch als Ausgangsbasis für eine 2011 vom Europäischen Komitee für Normung (CEN) ins Leben gerufene Arbeitsgruppe zur Entwicklung einer EU-Norm für die Berichterstattung direkter und indirekter CO₂-Emissionen in energieintensiven Industriebranchen.

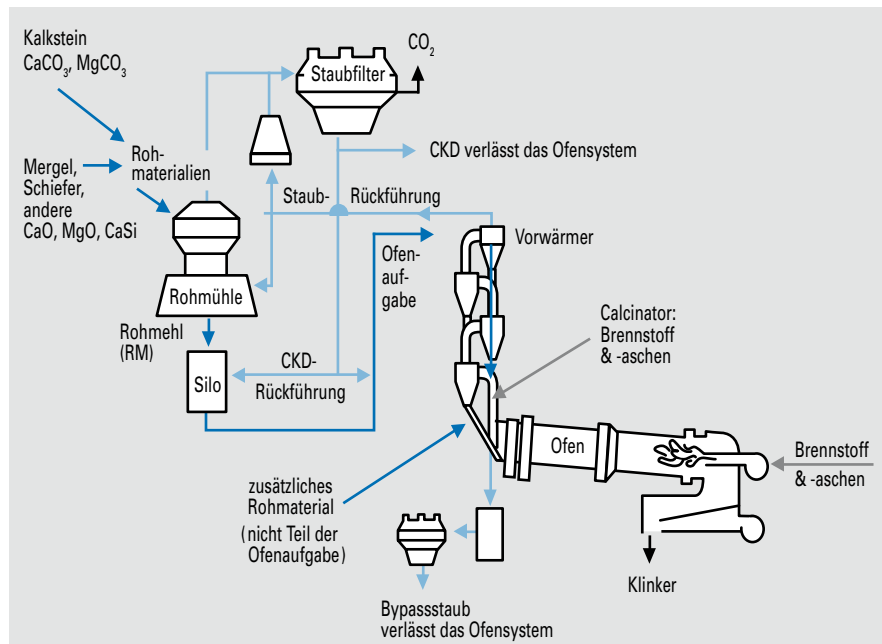


Bild II-7: Stoffströme im Klinkerbrennprozess

CO₂-Berichterstattung im EU-ETS

Die im Rahmen des EU-ETS verpflichtenden jährlichen CO₂-Emissionsberichte sind in der 2. Handelsperiode (2008 bis 2012) nach den Monitoring-Leitlinien der EU sowie Leitfäden und FAQ der Deutschen Emissionshandelsstelle (DEHSt) zu erstellen. Werkspezifische Methoden werden in einem Monitoring-Konzept (MK) festgelegt, das von der örtlichen Behörde genehmigt werden muss. Ein zentraler Punkt dabei ist die Festlegung und Einhaltung der geforderten Genauigkeitsebenen bei der Bestimmung der CO₂-Emissionen einzelner Stoffströme. Die Werke standen zu Beginn der 2. Handelsperiode vor der Herausforderung, ihre Bilanzierungsmethoden und relevanten Messeinrichtungen (z. B. Prozesswaagen) einer umfassenden Unsicherheitsbewertung zu unterziehen. Die regelmäßige Überprüfung und Justierung müssen dokumentiert werden und gewährleisten, dass die Genauigkeiten der Messinstrumente den Vorgaben entsprechen.

Für die 3. Handelsperiode (2013 bis 2020) enthält die 2012 von der EU-Kommission verabschiedete Verordnung zur Überwachung und Berichterstattung von CO₂-Emissionen (Monitoring and Reporting-Verordnung, M&R-Verordnung) einige Neuerungen. Als EU-Verordnung ist sie von den Mitgliedstaaten direkt anzuwenden und stellt verbindliche Anforderungen insbesondere an die Erstellung und Umsetzung der Überwachungspläne (ÜP), welche die Monitoringkonzepte ersetzen. In Deutschland sind diese Überwachungspläne künftig online in einem Formular-

Management-System (FMS) zu erstellen und noch vor Beginn eines Berichtsjahres der Deutschen Emissionshandelsstelle (DEHSt) zur Genehmigung vorzulegen.

CO₂ Capture and Storage

Die Minderung der CO₂-Emissionen ist ein globales Thema, das in den kommenden Jahren eine immer stärkere Bedeutung erlangen wird. Die Industrie muss dabei einen erheblichen Beitrag leisten, um die anspruchsvollen Klimaziele zu erreichen. In den vergangenen Jahren wurde eine Reihe so genannter „Roadmaps“ publiziert, mit denen ein möglicher Weg zur Erreichung der Emissionsziele aufgezeichnet wird. In der Regel ist dazu ein Portfolio von verschiedenen Maßnahmen erforderlich. Die Abscheidung von CO₂ aus Rauchgasströmen und die anschließende dauerhafte Speicherung in tiefen geologischen Schichten, d. h. das so genannte CCS-Verfahren (carbon capture and storage), spielen dabei eine entscheidende Rolle.

Die Zementindustrie ist nach dem Kraftwerksbereich einer der maßgeblichsten CO₂-Emittenten. Von der International Energy Agency (IEA) wurde daher eine eigene „Technology-Roadmap“ für den Zementsektor erstellt, in der mögliche Minderungsmaßnahmen inklusive des bestehenden Forschungsbedarfs sowie die zugehörigen politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen beschrieben werden.

Unter den möglichen Maßnahmen zur CO₂-Minderung in der Zementindustrie hat die

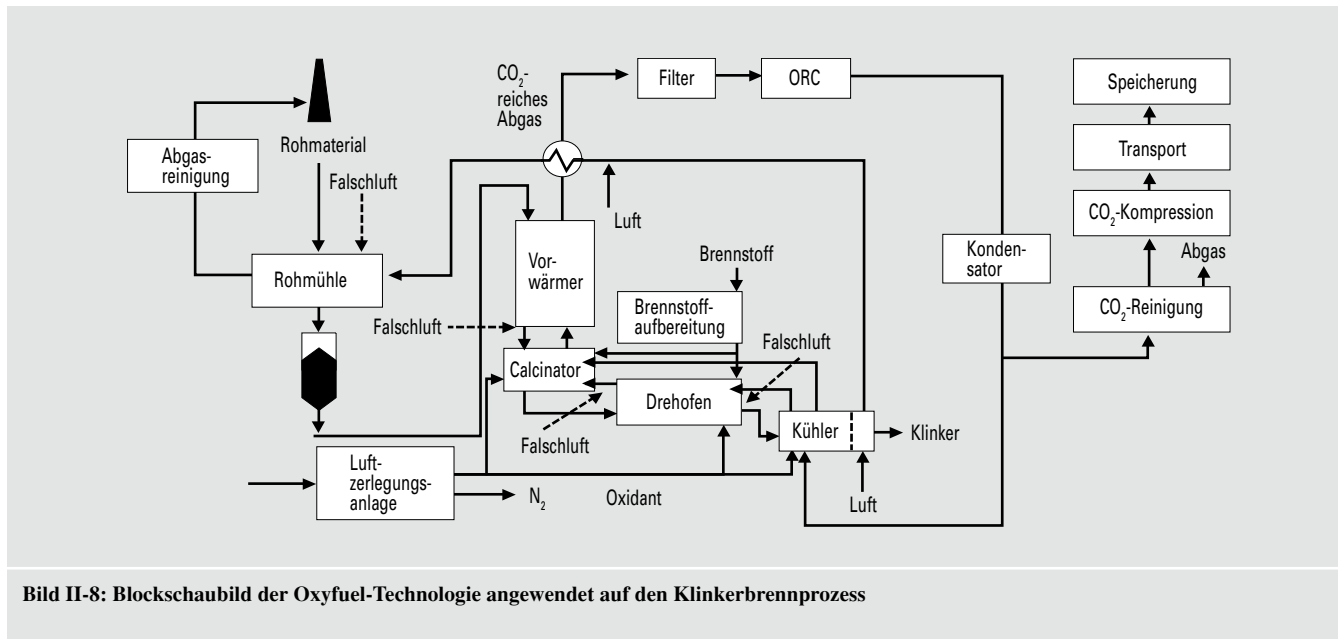


Bild II-8: Blockschaubild der Oxyfuel-Technologie angewendet auf den Klinkerbrennprozess

Anwendung von CCS-Technologien eine große Bedeutung. Dies gilt insbesondere deshalb, weil beim Klinkerbrennprozess rund 60 % der CO₂-Emissionen rohmateriell bedingt sind, d.h. aus der Calcination des Rohmaterials kommen. Von daher stehen andere Maßnahmen zur Minderung der spezifischen CO₂-Emissionen praktisch nicht zur Verfügung.

Von der International Energy Agency wird postuliert, dass im Jahr 2050 ca. 50 % der Zementofenanlagen in Europa, Nordamerika, Australien und Japan mit CCS-Technologien ausgestattet sein müssten. In den großen Schwellenländern China und Indien müssten demnach zumindest 20 % der Zementofenanlagen CCS anwenden.

Um solche anspruchsvollen Zielsetzungen zu erreichen, sind Forschung und Entwicklung sowie die Durchführung von Pilot- und Demonstrationsprojekten erforderlich. Derzeit sind allerdings die hohen Kosten der CCS-Verfahren ein großes Hindernis für die Einleitung der erforderlichen Schritte. Letztlich ist völlig offen, ob dieses Verfahren technisch und wirtschaftlich überhaupt anwendbar sein wird. In Deutschland und vielen anderen Mitgliedsländern der EU kommt noch hinzu, dass die Europäische CCS-Richtlinie mit Stand Frühjahr 2012 noch nicht in nationales Recht umgesetzt wurde. Diese fehlende Rechtssicherheit hat bewirkt, dass verschiedene CCS-Projekte im Kraftwerksbereich abgebrochen wurden.

Um sich den Herausforderungen von Klimaschutz und weitreichenden CO₂-Minderungsmaßnahmen zu stellen, hat die Euro-

pean Cement Research Academy (ECRA) im Jahr 2007 ein CCS-Forschungsprojekt begonnen, das in fünf Phasen gegliedert ist – von den ersten Literaturarbeiten über Labor- und Pilotversuche bis hin zur Durchführung eines Demonstrationsprojekts. Ende 2011 wurde die Phase III des Projekts abgeschlossen und in der ersten Hälfte des Jahres 2012 die Phase IV vorbereitet. Grundsätzlich sollen in der Phase IV weiterhin sowohl das Oxyfuel-Verfahren als auch das Post-Combustion-Verfahren parallel untersucht werden. Der Schwerpunkt soll dabei allerdings auf der Anwendung des Oxyfuel-Verfahrens liegen, während sich die Post-Combustion-Aktivitäten auf eine Begleitung an einem CCS-Projekt im norwegischen Zementwerk Brevik durch die ECRA beschränkt.

Abgesehen von dem ECRA-CCS-Projekt werden im Forschungsinstitut der Zementindustrie weitere F&E-Projekte zur CO₂-Abscheidung durchgeführt, die von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) gefördert werden.

Oxyfuel-Technik

Die Abtrennung des CO₂ aus dem Prozess ist ein wesentlicher Schritt der CCS-Technologie. Eine energetisch vergleichsweise günstige Methode ist die Oxyfuel-Technologie. Das Verfahren beruht auf der Idee industrielle Prozesse, wie beispielsweise das Klinkerbrennen mit reinem Sauerstoff zu betreiben. Aufgrund der Abwesenheit des sonst im Verbrennungsprozess stets mit eingetragenen Luftstickstoffs wird eine drastische Verringerung des Abgasvolumens und gleichzeitig eine Aufkonzentrierung des CO₂ erreicht. Durch dieses Auf-

konzentrieren des CO₂ im Abgas wird wiederum dessen Abscheidung deutlich erleichtert. Zur Einstellung der Temperaturprofile in der Ofenanlage muss zusätzlich CO₂ rezirkuliert werden. Weiterhin würde eine Anwendung dieser Technik sowohl den Anlagenbetrieb als auch die chemisch-mineralogischen Brenngutreaktionen beeinflussen.

Erfahrungen mit der Implementierung der Oxyfuel-Technik als Teil des CCS-Verfahrens liegen bisher nur in der Kraftwerksindustrie durch Pilotversuche vor. Diese sind aufgrund der Prozessführung und des Produkts nicht vollständig auf die Zementindustrie übertragbar. In der Zementindustrie werden bisher lediglich geringfügige Sauerstoffanreicherungen zur Produktionssteigerung oder zur Optimierung der Mitverbrennung alternativer Brennstoffe eingesetzt. Das Forschungsinstitut untersucht daher innerhalb eines Projekts die technologischen Auswirkungen und das CO₂-Minderungspotenzial der Oxyfuel-Technologie unter Zuhilfenahme von Prozessmodellierung und Laborexperimenten.

Auf Basis der experimentellen Untersuchungen im Labormaßstab konnten keine negativen Auswirkungen variierender Brenn- und Kühlumgebungen auf die Klinkerphasenbildung ermittelt werden. Die Analyse der Zementeigenschaften (Hydrationswärme, Festigkeitsentwicklung etc.) zeigte geringfügige Divergenzen unter 3 % zwischen dem Referenzzement und dem unter Oxyfuel-Bedingungen hergestellten Zement. Stabilisierend auf die Klinkerphasen wirkt dabei insbesondere die verbesserte Kühlung durch ein CO₂-haltiges Gas.

Keiner der Zemente ließ zudem eine Farbänderung erkennen. Auf der Grundlage dieser Experimente kann davon ausgegangen werden, dass ein entsprechend angepasster Oxyfuel-Betrieb die Produktqualität nicht negativ beeinflussen wird.

Unter Berücksichtigung der Forderung nach einer möglichst hohen CO_2 -Vermeidung wurde ein Anlagenschema entworfen, welches aus wärmetechnischer Sicht am effizientesten ist (**Bild II-8**). Da die Rekuperation von Wärme im Klinkerkühler ausschlaggebend für eine gute Energiebilanz ist, ist eine Teilung des Kühlers in zwei Segmente vorgesehen. Im heißen Bereich des Kühlers soll eine Mischung aus Sauerstoff und rezirkuliertem Abgas zugegeben werden, welche das Verbrennungsgas bilden. Die zweite Stufe wird mit Umgebungsluft betrieben, welche anschließend zur Rohmaterialtrocknung genutzt wird. Bedingt durch die unterschiedliche Zusammensetzung der anfallenden Gasströme ist das Abstimmen aller Abwärmeströme für die energetische Optimierung entscheidend. An erster Stelle muss genügend Energie zur Rohmaterialtrocknung vorhanden sein. Die Anforderung kann bei Bedarf mit einer Wärmeverschiebeanlage zwischen der Trocknungsluft und dem CO_2 -haltigen Abgas erfüllt werden. Die Oxyfuel-Technik sieht den Betrieb einer energieintensiven Luftzerlegungsanlage (LZA) und einer CO_2 -Aufbereitungsanlage (CPU) vor. Daher hat die energetische Integration dieser Aggregate über eine Stromerzeugung durch Abwärmenutzung ebenfalls einen hohen Stellenwert. Abhängig von der notwendigen Energie zur Rohmaterialtrocknung kann zudem ein Organic Rankine Cycle (ORC) kontinuierlich betrieben werden. Es resultiert eine direkte Wechselbeziehung zwischen den Abwärmenutzungsaggregaten.

Die Oxyfuel-Technik birgt nicht nur eine Beeinflussung des Anlagenbetriebs sondern ebenfalls zusätzliche Freiheitsgrade in Form der Rezirkulationsrate und des resultierenden Sauerstoffgehalts, die von der bisherigen konventionellen Prozessauslegung abweichen. Grundsätzlich wird durch die veränderte Gaszusammensetzung der Ofenatmosphäre eine Energieverschiebung in der Anlage hervorgerufen. Auch das Strömungsprofil in den Zyklonen des Vorwärmers wird durch die geänderte Abgaszusammensetzung beeinflusst, was wiederum Rückwirkungen auf die Staubabscheideleistung hat und somit eine weitere Energieverschleppung bewirkt. Bei der Substitution des Stickstoffs durch CO_2 äußert sich dieses in einem sinkenden Vor-

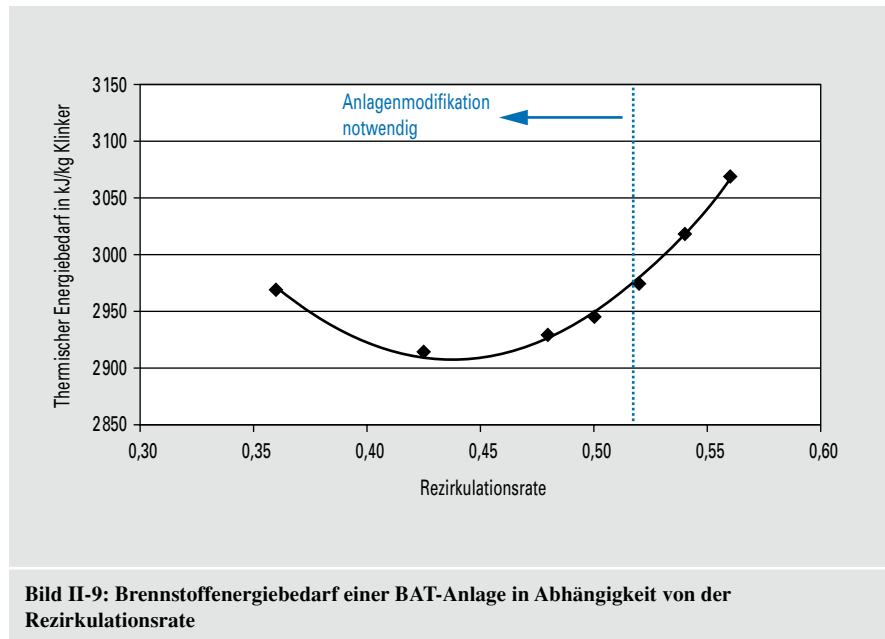


Bild II-9: Brennstoffenergiebedarf einer BAT-Anlage in Abhängigkeit von der Rezirkulationsrate

wärmerkapazitätsstromverhältnis und steigendem Kühlerkapazitätsstromverhältnis.

Zur Optimierung des Betriebs wurden vorrangig zwei Zustände als Grundlage für die Prozessmodellierung ausgewählt. Ein Betriebszustand soll eine Nachrüstung modellieren, wobei die Modifikationen an der Anlage auf das Wesentliche reduziert werden sollten. Hierfür liegt der optimale Betriebsbereich bei bereits 23 Vol.-% Sauerstoffanreicherung für eine BAT-Anlage, um die negativen Auswirkungen des CO_2 zu kompensieren. Insbesondere bei Nachrüstungen tritt das Problem des Platzmangels durch die zusätzlichen Installationen in den Vordergrund.

Bestünde die Möglichkeit, ein Werk losgelöst von Limitierungen vollständig neu zu konstruieren, ist die Zielgröße nicht nur die thermische Energieeffizienz, sondern ein globales Energieminimum über alle Aggregate. Grenzen sind der Variation der Rezirkulationsrate über die maximal zulässige thermische Belastung der Sinterzone oder des Dichtungsaggregats am Kühler durch eine verminderte Rekuperationszone gesetzt. Einhergehend mit einer Verringerung der Rezirkulationsrate sinkt der thermische Energiebedarf bis zu einem Minimum (**Bild II-9**). Eine weitere Verringerung bewirkt ein Ansteigen des Energiebedarfs aufgrund eines Kapazitätsstromverhältnisses im Vorwärmer, welches keine adäquate Vorwärmung des Materials zulässt. Die Rezirkulationsrate ist als Steuergröße nicht nur auf den Ofenbetrieb beschränkt. Darüber hinaus ist sie ebenfalls geeignet, um die anfallende Wärme im äußeren Bilanzraum zu steuern. Die Verringerung der

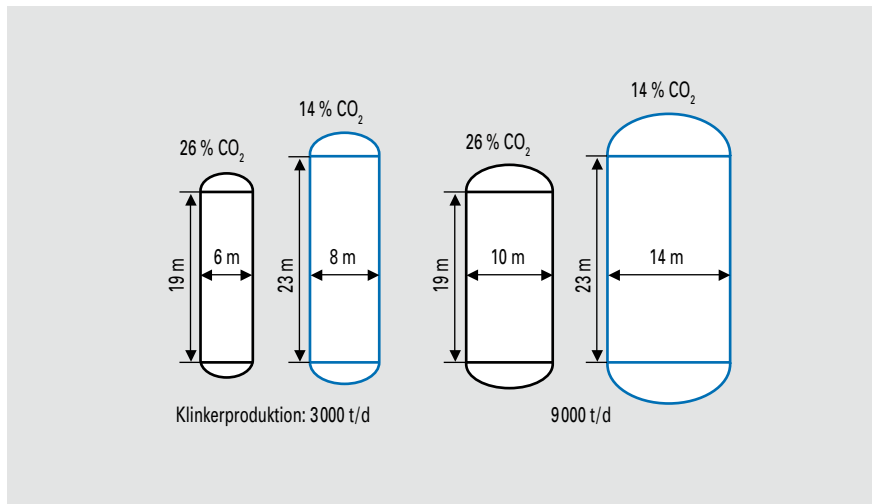
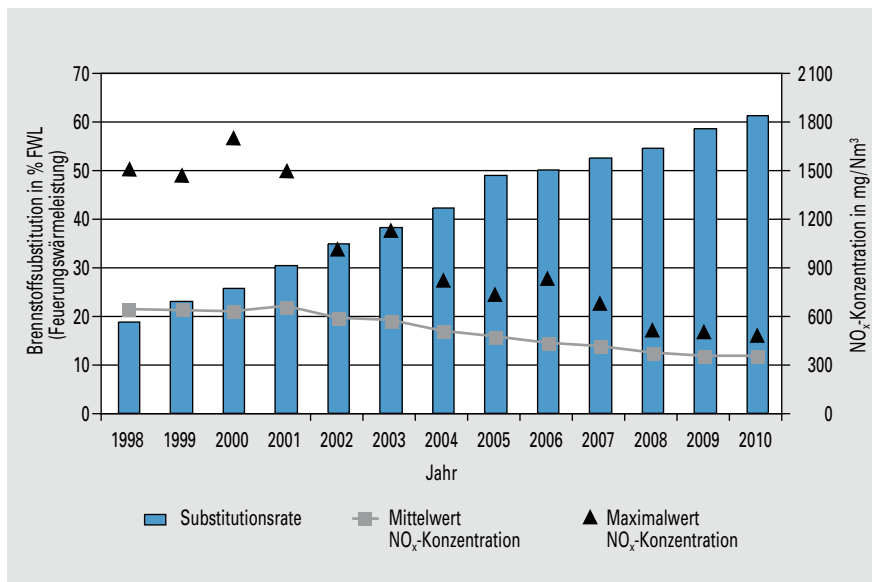
Rezirkulationsrate bewirkt eine Verlagerung des Abwärmemaximums vom Abgas hin zu der Kühlerabluft, was wiederum vorteilhaft für die Rohmaterialtrocknung sein kann. Durch die gezielte Steuerung der Abwärme mit der Rezirkulationsrate kann der Betrieb individuell auf die spezifischen Gegebenheiten der jeweiligen Anlage sowie des Materialvorkommens abgestimmt werden.

Wesentlich ist auch der Einfluss der Abgaszusammensetzung auf den Energiebedarf der CPU. Die Anreicherung des CO_2 im Abgas wird hauptsächlich bestimmt durch die Wahl des Brennstoffs, den Sauerstoffüberschuss der Verbrennung, der Sauerstoffreinheit von der LZA und insbesondere den Anteil an Falschluff in der Anlage. Basierend auf einem Falschluffeinbruch von 6 % wird eine ausreichend gute CO_2 -Anreicherung im zu behandelnden Abgas ermittelt. Die Abtrennrates des Prozesses wird maßgeblich und unabhängig von der Rezirkulationsrate von der CO_2 -Aufbereitungsanlage bestimmt.

Aufgrund der bisher erzielten Ergebnisse ist davon auszugehen, dass die Oxyfuel-Technik grundsätzlich anwendbar ist. Allerdings ist nach derzeitigem Kenntnisstand mit einer Erhöhung der Zementherstellungskosten um ca. 40 % infolge einer Verdopplung des elektrischen Energiebedarfs zu rechnen, weshalb das Verfahren aus heutiger Sicht noch nicht wirtschaftlich betrieben werden kann.

Post Combustion Carbon Capture

Unter dem Begriff der nachträglichen Kohlendioxidabtrennung, dem so genannten

Bild II-10: Einfluss der CO₂-Konzentration auf die AbsorbergrößeBild II-11: Entwicklung der NO_x-Emissionen von 1998 bis 2010 mit Darstellung der Brennstoffsubstitution

post combustion carbon capture, werden alle Verfahren zusammengefasst, die das CO₂ aus dem Rauchgas abtrennen. Diese Verfahren sind daher grundsätzlich geeignet, um bestehende Zementwerke im Nachhinein mit einer CO₂-Abtrennung auszustatten. Wesentliche Verfahren dieser Gruppe sind die Aminwäsche, die gekühlte Ammoniakwäsche, der regenerative Carbonatkreislauf und verschiedene Membrantechniken. Wesentliche Forschungsvorhaben bezogen sich bis jetzt hauptsächlich auf die Aminwäsche, die anderen Verfahren werden aber ebenso für den Einsatz in der Zementindustrie diskutiert. Ihnen ist gemein, dass sie noch nicht grundsätzlich für den industriellen Einsatz zur Verfügung stehen. Je nach Verfahren befindet sich die Entwicklung im Pilot- oder Demonstrationsstadium.

Während bei der Aminwäsche und der Ammoniakwäsche das CO₂ mit einer wässrigen Lösung reagiert, kommt beim Carbonatkreislauf feingemahlenes CaO zum Einsatz, welcher bei Temperaturen von etwa 700 °C mit dem CO₂ reagiert. Dieses Verfahren ist jedoch noch recht neu, ähnlich wie der Einsatz von CO₂-selektiven Membranen, die eine CO₂-Abtrennung ganz ohne flüssige oder feste Stoffkreisläufe ermöglichen. Derartige Membranen haben aber bis jetzt noch keine industrielle Einsatzreife erreicht.

Um die Kohlendioxidabtrennung genauer zu beschreiben, wurde am Forschungsinstitut der Zementindustrie ein entsprechendes Modell umgesetzt. Mit dieser numerischen Simulation wurden die physika-

lisch-chemischen Vorgänge während der CO₂-Absorption berechnet. Auf dieser Grundlage wurde auch beispielhaft eine Absorptionskolonne ausgelegt.

Die computergestützten Berechnungen zeigen, dass sich die hohe CO₂-Konzentration im Abgas von Zementwerken günstig auf die erforderliche Anlagengröße auswirkt (**Bild II-10**). Verglichen mit einem Kraftwerk kann die Absorptionskolonne für ein Zementwerk mit vergleichbarem CO₂-Ausstoß deutlich kleiner dimensioniert werden. Dementsprechend sinken das erforderliche Packungsvolumen und auch der damit verbundene Investitionsaufwand.

Je nach Anlagengröße wird für ein Zementwerk eine Absorptionskolonne mit einem Durchmesser zwischen 6 und 12 m benötigt. Diese Dimensionen sind derzeit nicht kommerziell verfügbar. Die Höhe der Kolonne wird dabei unabhängig von ihrem Durchmesser zwischen 20 und 35 m betragen, hier ist wesentlich das eingesetzte Absorptionsmittel entscheidend.

Durch die hohe Kohlendioxidkonzentration im Abgas kommt es insbesondere im oberen Teil der Absorptionskolonne zu einer verstärkten Wärmefreisetzung, was die Absorption wiederum behindert. Hier könnte in Zukunft das Verfahren durch den Einsatz einer Zwischenkühlung noch weiter verbessert werden.

Neben dem hohen Energieeinsatz für die Kohlendioxidabtrennung gilt die chemische Degradation der Absorptionslösung als ein Hauptproblem für den großtechnischen Einsatz. Da die erforderlichen Chemikalien einige Euro pro Kilogramm kosten, würden selbst geringe Verluste im Bereich von 1 kg/t abgetrenntes CO₂ zu deutlichen Mehrkosten führen.

Daher wurde in Literaturstudien und praktischen Versuchen untersucht, welche Absorbentien sich grundsätzlich eignen und wie erheblich sich die Degradation bei Kontakt mit Zementwerksabgasen auswirkt.

Labor- und Werksversuche bestätigten, dass insbesondere Amine mit hoher Reaktivität, wie z. B. Monoethanolamin (MEA), verstärkt der Degradation ausgesetzt sind. Dazu tragen neben Schwefeldioxid, Chlor- und Fluorwasserstoff auch Sauerstoff und in geringem Maße Stickstoffoxide bei. Die hohe CO₂-Konzentration mildert diese Effekte zum Teil ab, da die CO₂-reiche Absorptionslösung wesentlich weniger emp-

findlich reagiert. Dieser mildernde Effekt nimmt mit steigender CO_2 -Konzentration noch zu.

Andere Absorptionslösungen, wie Methyl-diethanolamin (MDEA) oder Aminomethylpropanol (AMP), reagieren weniger stark auf Verunreinigungen im Abgas. Diese Amine reagieren aber auch langsamer mit CO_2 , weshalb im industriellen Einsatz noch so genannte Aktivatoren zugesetzt werden, deren Degradationsverhalten es dann separat zu betrachten gilt.

Zementwerke, die geringe SO_2 -Frachten aufweisen, bieten insbesondere für den Einsatz der Aminwäsche Vorteile. In Werken mit einem Jahresmittelwert von mehr als $30 \text{ mg/m}^3 \text{ SO}_2$ ist eine zusätzliche Rauchgasentschwefelung erforderlich.

Im Ergebnis zeigt sich eine deutliche Sensivität der Degradation in Abhängigkeit von der eingesetzten Absorptionslösung. Demnach ist es auch möglich, dass die ideale Aminzusammensetzung je nach Werksspezifika variieren könnte.

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 als pdf-Datei zum Download zur Verfügung. Zusätzlich können gedruckte Exemplare über die Literaturstelle des VDZ angefordert werden.

Die Broschüre dokumentiert den Einsatz von Roh- und Brennstoffen zur Klinker- und Zementproduktion. Insbesondere werden die Einsatzmengen der alternativen Brennstoffe detailliert dargestellt. Im Jahr 2010 betrug der Anteil der alternativen Brennstoffe am gesamten Brennstoffenergieeinsatz 61 %. 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_x (**Bild II-11**) und SO_2 , sowie alle relevanten Spurenelemente und organischen Abgasbestandteile. Deren Konzentrationen in den Reingasen wurden 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

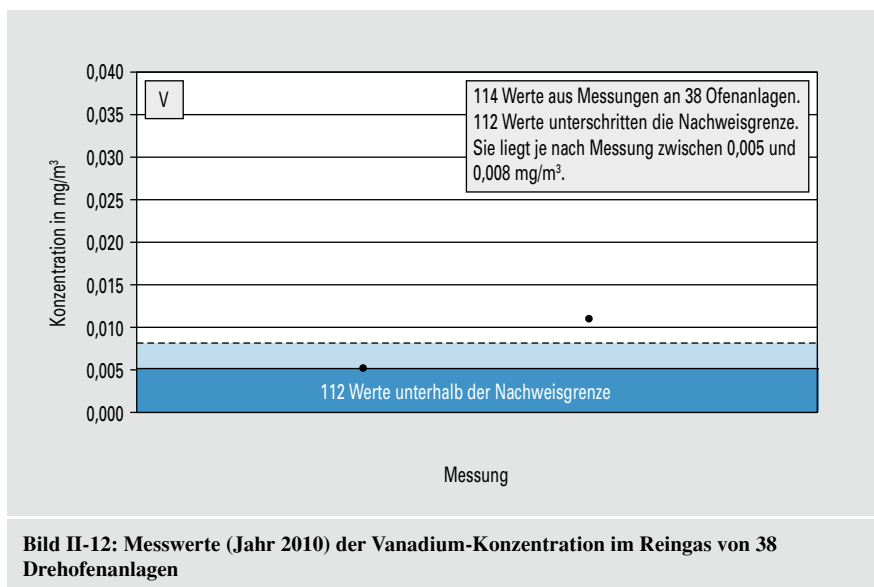


Bild II-12: Messwerte (Jahr 2010) der Vanadium-Konzentration im Reingas von 38 Drehofenanlagen

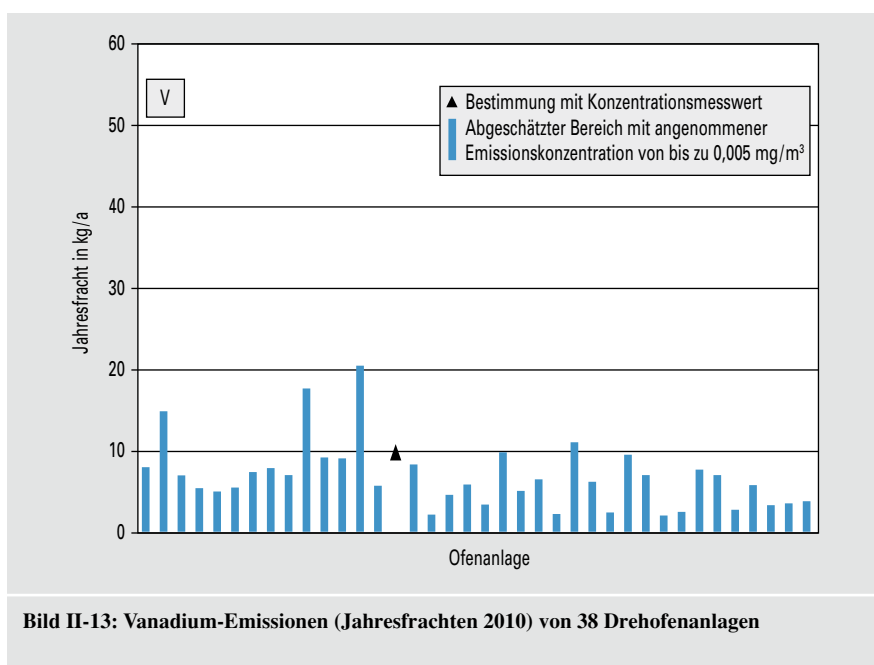


Bild II-13: Vanadium-Emissionen (Jahresfrachten 2010) von 38 Drehofenanlagen

Messung bestimmbar war, sind eindeutige Angaben sowohl für die Konzentration als auch 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 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 häufig unter der Nachweisgrenze des Messverfahrens. In **Bild II-12** werden beispielhaft die Emissionskonzentrationen des Spurenelements Vanadium in mg/m^3 dargestellt. Insgesamt wurden z. B. im Jahr 2010 durch Messungen an 38 Ofenanlagen 114 Werte für die Vanadium-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 $0,005$ und $0,008 \text{ mg/m}^3$ beträgt (Quer Balken).

In **Bild II-13** kann daher nur für eine Anlage die Vanadium-Fracht über die Kon-

zentrationenwerte und den Reingasvolumenstrom (m^3/Jahr) eindeutig angegeben werden (Dreieck). Für 37 Anlagen müssen die Emissionen über einen angenommenen Konzentrationswert von $0,005 \text{ mg}/\text{m}^3$ abgeschätzt werden (Linien). Die tatsächlich emittierten Frachten entsprechen nur im ungünstigsten Fall den gezeigten Obergrenzen, was insbesondere bei einer umweltpolitischen Bewertung der Zahlen berücksichtigt werden muss.

Minderung gas- und staubförmiger Emissionen ■

Stand der NO_x -Minderung

Die deutsche Zementindustrie hat in den vergangenen Jahren die NO_x -Emissionen der Drehofenanlagen signifikant gemindert. Gemäß den für die VDZ-Umweltdaten berichteten Messwerten konnten die NO_x -Emissionen im Branchenmittel von ca. $560 \text{ mg}/\text{m}^3$ im Jahr 2000 auf etwa $350 \text{ mg}/\text{m}^3$ im Jahr 2010 gesenkt werden. Fast alle Ofenanlagen liegen innerhalb des erreichbaren Emissionsniveaus von 200 bis $450 \text{ mg}/\text{m}^3$, das im europäischen BREF-Dokument für Drehofenanlagen mit Zyklorvorwärmer festgelegt wurde. Als leistungsfähige NO_x -Minderungsmaßnahme wird an 38 Ofenlinien das SNCR-Verfahren (selektive nicht-katalytische Reduktion) angewendet. Über dieses Verfahren liegen bereits seit vielen Jahren umfangreiche Betriebserfahrungen vor, sodass es als „BAT“ (Best Available Technique) gilt. Mit diesem Stand der NO_x -Minderung trägt die deutsche Zementindustrie dem Umstand Rechnung, dass sie national im Vergleich zu anderen Ländern sehr strenge Grenzwerte einhalten muss.

Zur sicheren Einhaltung dieser anspruchsvollen NO_x -Grenzwerte sind meist Sekundärmaßnahmen anzuwenden. Sofern alternative Brennstoffe eingesetzt werden – und dies ist an fast allen Ofenanlagen der Fall – sind die Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV zu beachten. Bei Substitutionsraten über 60 % gelten für die Komponente NO_x so genannte Mischgrenzwerte, die zwischen $320 \text{ mg}/\text{m}^3$ (bei 60,1 % Substitutionsrate) und $200 \text{ mg}/\text{m}^3$ (bei 100 % Substitutionsrate) liegen. Durch die Anwendung des SNCR-Verfahrens lassen sich solch niedrige NO_x -Grenzwerte zwar häufig einhalten, doch gleichzeitig ist dies oft mit einem Anstieg der NH_3 -Emissionen (NH_3 -Schlupf) verbunden.

Im Zuge der Umsetzung der Europäischen „Industrial Emissions Directive“ (IED) in

deutsches Recht ist eine Novellierung der 17. BImSchV im Gange, die aus heutiger Sicht eine weitere Verschärfung der NO_x -Grenzwerte mit sich bringen wird. Demnach soll zukünftig für Ofenanlagen zur Herstellung von Zementklinker im Falle der Mitverbrennung von Abfällen ein NO_x -Emissionsgrenzwert von $200 \text{ mg}/\text{m}^3$ gelten. Zusätzlich ist auch ein NH_3 -Grenzwert von $30 \text{ mg}/\text{m}^3$ (NH_3 -Schlupf) vorgesehen. Die Einhaltung eines sehr niedrigen NO_x -Grenzwerts, verbunden mit einem Grenzwert für den NH_3 -Schlupf, könnte damit zu einem limitierenden Kriterium für die Anwendung des SNCR-Verfahrens werden.

Eine Lösung dieses Problems könnte das SCR-Verfahren (selektive katalytische Reduktion) sein, das in einem Temperaturfenster von ca. 250 bis 400°C angewendet wird. Wie beim SNCR-Verfahren wird Ammoniak- oder Harnstoff-Lösung als Reduktionsmittel in den Abgasstrom eingedüst. Das Abgas wird anschließend durch einen Reaktor geleitet, der mit mehreren Katalysatorlagen bestückt ist. Damit kann praktisch eine stöchiometrische Reaktion zwischen NH_3 und NO erreicht werden, sodass selbst bei sehr hohen NO_x -Minderungsraten nur minimale NH_3 -Emissionen resultieren. Insbesondere die Investitionskosten sind bei diesem Verfahren allerdings deutlich höher als beim SNCR-Verfahren.

Zudem ist die katalytische Reduktion in der Zementindustrie bisher noch nicht „Stand der Technik“ bzw. BAT. Daher werden in der deutschen Zementindustrie zwei Demonstrationsprojekte durchgeführt, um Erkenntnisse und limitierende Faktoren über die Anwendbarkeit des SCR-Verfahrens zu gewinnen. Insofern ist es aus Sicht der Zementindustrie unerlässlich, dass bis zum Abschluss beider Demonstrationsprojekte weiterhin Ausnahmeregelungen bei der Festlegung der NO_x -Grenzwerte erteilt werden könnten, da bisher noch keine ausreichende Datenbasis für weitreichende Investitionsentscheidungen vorliegt.

Stand der SCR-Demonstrationsvorhaben (Mergelstetten / Rohrdorf)

Das SCR-Verfahren wird in Kraftwerken und Müllverbrennungsanlagen bereits seit rund 30 Jahren zur NO_x -Minderung angewendet. Die dort gewonnenen Betriebserfahrungen lassen sich allerdings nicht unmittelbar auf Ofenanlagen der Zementindustrie übertragen, da sich die Abgasrandbedingungen und -zusammensetzung je nach Prozess deutlich unterscheiden. So stellen beispielsweise die hohen Staubkonzentrationen im Abgas von Zementdreh-

ofenanlagen spezielle Anforderungen an das Katalysatormaterial und die Abreinigungstechnik. Neben einigen Pilotanlagen waren bis 2010 weltweit nur drei SCR-Anlagen in Zementwerken installiert, davon eine in Süddeutschland, die von 2001 bis 2006 in Betrieb war.

Um das im Hinblick auf die weitergehende NO_x -Minderung vielversprechende SCR-Verfahren für den Einsatz beim Klinkerbrennprozess weiterzuentwickeln und die noch bestehenden Unsicherheiten und Risiken zu minimieren, wurden zwei Demonstrationsvorhaben in der deutschen Zementindustrie begonnen. Beide Projekte werden vom Bundesumweltministerium und dem Umweltbundesamt unterstützt und mit öffentlichen Mitteln finanziell gefördert. Im Zementwerk Mergelstetten wurde im Frühjahr 2010 eine neue SCR-Anlage in Rohgaschaltung (High-Dust-SCR) in Betrieb genommen. Der mit 3,5 Katalysatorlagen bestückte Reaktor wird dabei direkt mit dem aus dem Wärmetauscher austretenden staubbeladenen Ofenabgas durchströmt. Druckluftbetriebene Rußbläser sorgen dabei für die regelmäßige Abreinigung der Katalysatorlagen.

Im Frühjahr 2011 ging eine weitere SCR-Anlage im Zementwerk Rohrdorf in Betrieb. Im Unterschied zu der Anlage in Mergelstetten wurde hier die so genannte Reingasvariante (Low-Dust- bzw. Tail-End-SCR) installiert. Der Reaktor ist dabei hinter dem Abgasfilter positioniert. Dies hat den Vorteil, dass die Gefahr von Verstopfungen des Katalysators weitaus geringer ist als bei der High-Dust Variante. Ein Nachteil des Tail-End-Verfahrens ist, dass das eintretende Abgas über eine externe Wärmequelle erst wieder auf die erforderliche Reaktionstemperatur aufgeheizt werden muss. Im Zementwerk Rohrdorf wird das Abgas über mehrere Wärmetauscher, sowohl über das aus dem Katalysator austretende Abgas als auch über die heiße Mittenabluft des Klinkerkühlers, wieder aufgeheizt.

Beide Vorhaben werden durch das Forschungsinstitut der Zementindustrie mit umfangreichen Messkampagnen begleitet. Schwerpunkt der Untersuchungen in Mergelstetten ist der Kombinationsbetrieb der SCR- mit der dort bereits vorhandenen SNCR-Anlage. Dabei soll ermittelt werden, ob durch die Kombination beider Verfahren die nachgeschaltete SCR-Anlage gegebenenfalls kleiner ausgelegt und damit bei zukünftigen Vorhaben Investitions- und Betriebskosten gespart werden könnten. Darüber hinaus werden Untersu-

chungen zur Abreinigung und zum Aktivitätsverlust bzw. Desaktivierungsmechanismen des Katalysatormaterials durchgeführt. In Rohrdorf hingegen liegt der Schwerpunkt auf spezifischen Fragestellungen zur Reingasschaltung in Kombination mit der Wärmeverschiebung. Außerdem soll in beiden Vorhaben der Einfluss des Katalysators auf die Konzentration organischer Verbindungen und weiterer Abgaskomponenten, z. B. Quecksilber, untersucht werden.

Im österreichischen Zementwerk Mannersdorf wurde im Frühjahr 2012 eine weitere SCR-Anlage in Betrieb genommen. In diesem Fall wurde eine Semi-Dust-Schaltung realisiert, bei der das Ofenabgas mittels eines Heißgas-Elektrofilters auf eine Konzentration um 5 mg/m^3 vorentstaubt wird. Im VDZ-Arbeitskreis NO_x -Minderung wird regelmäßig über den Fortgang der laufenden SCR-Projekte berichtet und die aktuellen Betriebserfahrungen ausgetauscht.

Verlässliche Ergebnisse werden aber erst nach Abschluss der Demonstrationen vorliegen.

Neuere Entwicklungen im Bereich der Quecksilberemissionstechnik

Drehofenanlagen der Zementindustrie, die der 17. BImSchV unterliegen, müssen aufgrund der rechtlichen Anforderungen mit kontinuierlich arbeitenden Quecksilbermessgeräten ausgestattet werden. Hierfür kommen nur Geräte in Frage, die im Vorfeld eine Eignungsprüfung gemäß VDI 4203 bzw. DIN EN ISO 14956 durchlaufen haben und von den zuständigen Behörden entsprechend anerkannt wurden. Eine aktuelle Liste aller eignungsgeprüften Geräte ist unter www.umweltbundesamt.de abgelegt.

Die für den Einsatz an Drehofenanlagen der Zementindustrie derzeit (Stand Mai 2012) zugelassenen kontinuierlich arbeitenden Quecksilbermessgeräte wurden in den 1990er Jahren entwickelt und haben ihre Eignungsprüfungen im Zeitraum von 1996 bis 2001 durchlaufen. Die Erfahrungen in den Folgejahren haben gezeigt, dass trotz der erfolgreich absolvierten Eignungsprüfungen in der Praxis immer wieder Schwierigkeiten beim stabilen Langzeitbetrieb der Messgeräte auftraten. Aufgrund der im Rahmen einer Vielzahl von Emissionsmessungen, Kalibrierungen und Funktionsprüfungen gewonnenen Erfahrungen wurde durch entsprechende Geräte-modifikationen eine verbesserte Anpassung an die Besonderheiten der Abgasmatrix von Drehofenanlagen der Zementindustrie er-

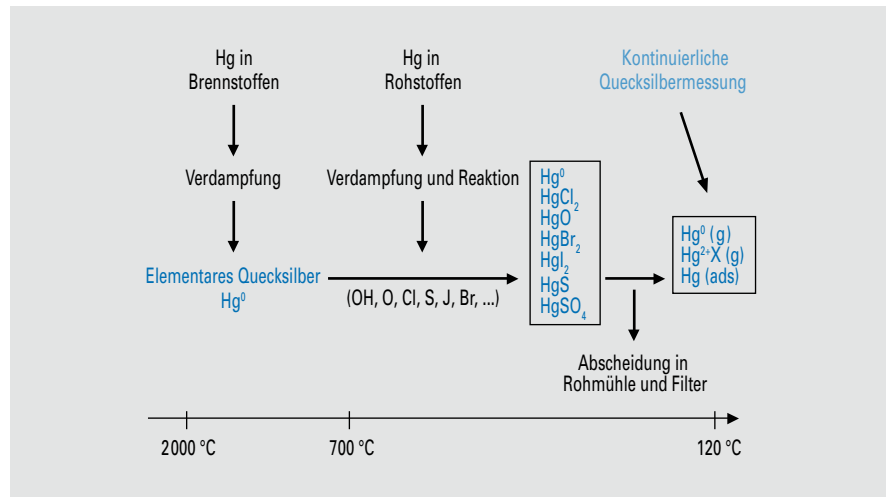


Bild II-14: Mögliche Umsetzungsreaktionen des Quecksilbers beim Klinkerbrennprozess

reicht. Trotz dieser von Geräteherstellern und Betreibern gemeinsam mit dem Forschungsinstitut der Zementindustrie erbrachten Anstrengungen konnten nicht alle Fragestellungen abschließend geklärt werden.

Vor diesem Hintergrund – aber auch aufgrund der seit Ende 2011 in den USA diskutierten drastischen Verschärfung der Emissionsgrenzwerte für Feuerungsanlagen – haben verschiedene Gerätehersteller grundlegend neu entwickelte Quecksilbermessgeräte auf den Markt gebracht. Diese Geräte befinden sich in Deutschland – mit einer Ausnahme – noch in der Eignungsprüfung. Aufgrund einer Überarbeitung der entsprechenden Richtlinien ist es zwischenzeitlich erforderlich, die Eignungsprüfung an unterschiedlichen Anlagenarten durchzuführen. Dabei wird für kontinuierlich arbeitende Quecksilbermessgeräte zwischen Mono- und Mitverbrennungsanlagen gemäß 17. BImSchV unterschieden. Die alleinige Eignungsbekanntgabe für eine Monoverbrennungsanlage ist für die Einsetzbarkeit des jeweiligen Geräts an einer Drehofenanlage der Zementindustrie nicht mehr ausreichend. Aufgrund dieses Zusatzaufwands hat sich der Abschluss der Eignungsprüfungen bei den Geräteherstellern bislang verzögert. Der Gerätetyp, dessen Eignungsprüfung bereits im Jahr 2011 abgeschlossen wurde, ist – im Gegensatz zum Vorgängermodell – nur noch für Monoverbrennungsanlagen zugelassen. Trotz der fehlenden Eignungsprüfungen werden die neu entwickelten Quecksilbermessgeräte in besonderen Einzelfällen und nach Rücksprache mit den zuständigen Überwachungsbehörden bereits jetzt an einigen Standorten der Zementindustrie eingesetzt. Dieser Schritt wurde für die Betreiber not-

wendig, weil die üblicherweise in der Zementindustrie verwendeten Gerätetypen an diesen Standorten nicht mit der erforderlichen Genauigkeit zur Emissionsüberwachung eingesetzt werden konnten.

Die kontinuierliche Messung von Quecksilberemissionen stellt eine besondere Herausforderung dar, weil Quecksilber im Abgas von Feuerungsanlagen in sehr unterschiedlichen Bindungsformen vorliegen kann. Grundsätzlich ist dabei zwischen elementarem Quecksilber [$\text{Hg}(0)$] und oxidiertem Quecksilber [$\text{Hg}(I)$ oder $\text{Hg}(II)$] zu unterscheiden. Neben den nach bisherigem Kenntnisstand wichtigsten Vertretern HgCl_2 und Hg_2Cl_2 kommt eine Vielzahl von anderen Abgasbestandteilen als Bindungspartner in Frage (Bild II-14). Während elementares und oxidiertes Quecksilber gasförmig im Abgas vorliegen, ist je nach Abgastemperatur und Höhe der Staubemissionen auch der Anteil des partikelgebundenen Quecksilbers zu berücksichtigen.

Kontinuierlich arbeitende Quecksilbermessgeräte müssen in der Lage sein, dieses komplexe Gemisch unterschiedlicher Komponenten vollständig zu erfassen. Die in allen Quecksilbermessgeräten eingesetzten UV-Photometer können lediglich die elementare Form des Quecksilbers [$\text{Hg}(0)$] detektieren. Für eine vollständige Messung der Gesamtquecksilberemissionen ist daher eine vorhergehende Reduktion der Quecksilberverbindungen in elementares Quecksilber unabdingbar. Dieser Aufbereitungsschritt ist letztlich entscheidend für die Qualität der kontinuierlichen Gesamt-Quecksilbermessung.

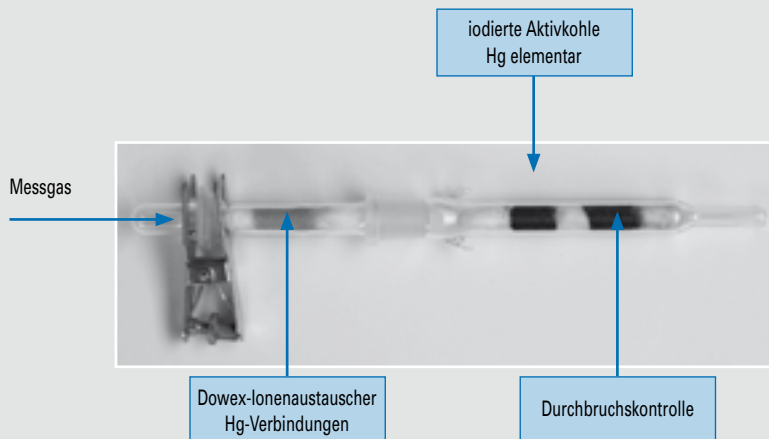


Bild II-15: Gefüllte Adsorptionsröhrchen für das Dowex-Jodkohle-Verfahren

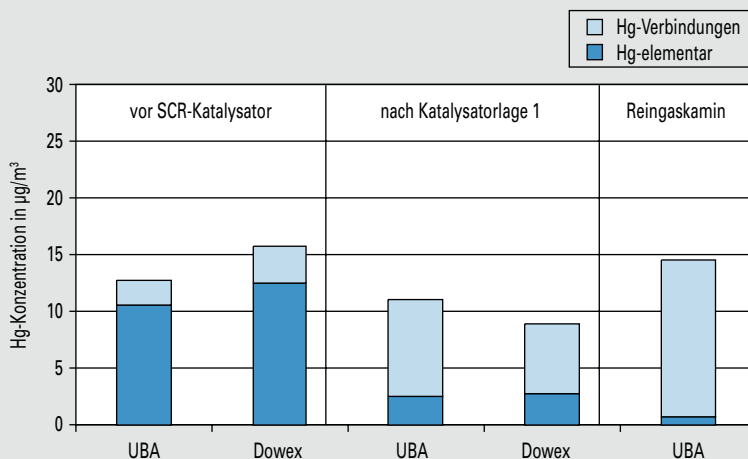


Bild II-16: Beispiel für den Einsatz der verschiedenen Spezifizierungsmethoden an einer Dreihofenanlage mit SCR-Denox-Katalysator

Bei den neu entwickelten Quecksilbermessgeräten ist zwischen zwei grundlegend unterschiedlichen Ausführungen zu unterscheiden. Weiterhin sind Geräte im Einsatz, bei denen die Reduzierung des gebundenen Quecksilbers an einem Thermokatalysator stattfindet. Um eine vorzeitige Kontamination des Katalysators und den damit verbundenen Verlust der Reaktivität zu verhindern, findet bereits in der Entnahmesonde eine Probengasverdünnung statt. Gleichzeitig werden hierdurch mögliche Querempfindlichkeiten durch andere Abgasbestandteile wie z. B. SO_2 vermindert. Einige dieser Geräte sind zusätzlich mit einer Goldfalle (Amalgamierung) ausgestattet, um die Empfindlichkeit im Bereich

niedriger Emissionskonzentrationen zu verbessern.

Eine grundlegend neu entwickelte Alternative zu den Geräten mit Thermokatalysator stellt die so genannte Hochtemperaturkonvertierung dar. Bei diesem Gerätetyp wird das Messgas in eine auf 1 000 °C beheizte Quarz-Messzelle geleitet. Bei diesen Temperaturen werden Quecksilberverbindungen unmittelbar zu elementarem Quecksilber reduziert und können direkt im Photometer gemessen werden.

Alle Geräte können optional mit automatischen Justiervorrichtungen ausgestattet werden, die eine regelmäßige Überprüfung

mit elementarem Quecksilberprüfgas oder Quecksilberverbindungen gestatten. Diese Zusatzmodule ermöglichen eine tägliche Funktionskontrolle der Messgeräte. Darüber hinaus können auf diese Weise die Anforderungen der DIN EN 14181 im Hinblick auf die vom Betreiber zu erbringende regelmäßige Qualitätskontrolle (QAL 3) erfüllt werden.

Die Bindungsformen des Quecksilbers sind für die kontinuierliche Quecksilbermessung aber auch für Maßnahmen zur Quecksilber-Emissionsminderung von entscheidender Bedeutung. Aus dem Bereich der Kraftwerksindustrie ist bekannt, dass dort große Anstrengungen unternommen werden, das im Abgas vorliegende Quecksilber möglichst vollständig in eine oxidierte Form zu überführen. Während oxidierte Quecksilberverbindungen durch Zugabe von Adsorbentien oder in Nasswäschern effektiv abgeschieden werden, wird elementares Quecksilber von diesen Minderungsmaßnahmen nicht vollständig erfasst. Demgegenüber stellt das Vorhandensein größerer Anteile an Quecksilberverbindungen im Abgas höhere Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der kontinuierlichen Quecksilbermessung.

Aufgrund dieser Zusammenhänge kommt der Messung unterschiedlicher Quecksilberspezies zunehmend größere Bedeutung zu. Im Forschungsinstitut der Zementindustrie stehen hierzu mehrere Methoden zur Verfügung, die ständig verbessert und weiterentwickelt werden. Alle Methoden ermöglichen die Aufschlüsselung in partikelgebundenes, elementares und oxidiertes Quecksilber. Die Messung einzelner Quecksilberspezies ist mit Ausnahme des elementaren Quecksilbers bis auf weiteres nicht möglich.

Die Spezifizierung kann nach der so genannten „UBA-Methode“ oder auch nach dem Dowex-Jodkohle-Verfahren erfolgen. Bei der UBA-Methode handelt es sich um eine Modifikation des Standardreferenzverfahrens nach DIN EN 13211. Dabei wird der Probengasvolumenstrom zunächst über ein Planfilter geleitet, um die Partikelphase abzuscheiden. Anschließend durchströmt der Gastrom drei hintereinandergeschaltete Waschflaschen, von denen die erste mit verdünnter Salzsäure und die nachfolgenden mit einer Kaliumpermanganatlösung gefüllt sind. Wasserlösliche Quecksilberverbindungen, in erster Linie Quecksilberchlorid (HgCl_2), wird dabei von elementarem Quecksilber getrennt und beide Anteile können separat analysiert werden.

Beim Dowex-Jodkohle-Verfahren wird das Messgas über zwei Adsorbentien geleitet, die im Hinblick auf die Quecksilberabscheidung unterschiedliche Eigenschaften aufweisen (**Bild II-15**). Im ersten Sammelröhrchen befindet sich ein speziell vorbehandeltes Adsorberharz, an dem oxidiertes Quecksilber selektiv abgeschieden wird, im nachfolgenden Jodkohle-Röhrchen wird das elementare Quecksilber adsorbiert. Durch getrennte Analyse können wie beim UBA-Verfahren die Anteile an elementarem und oxidiertem Quecksilber getrennt bestimmt werden.

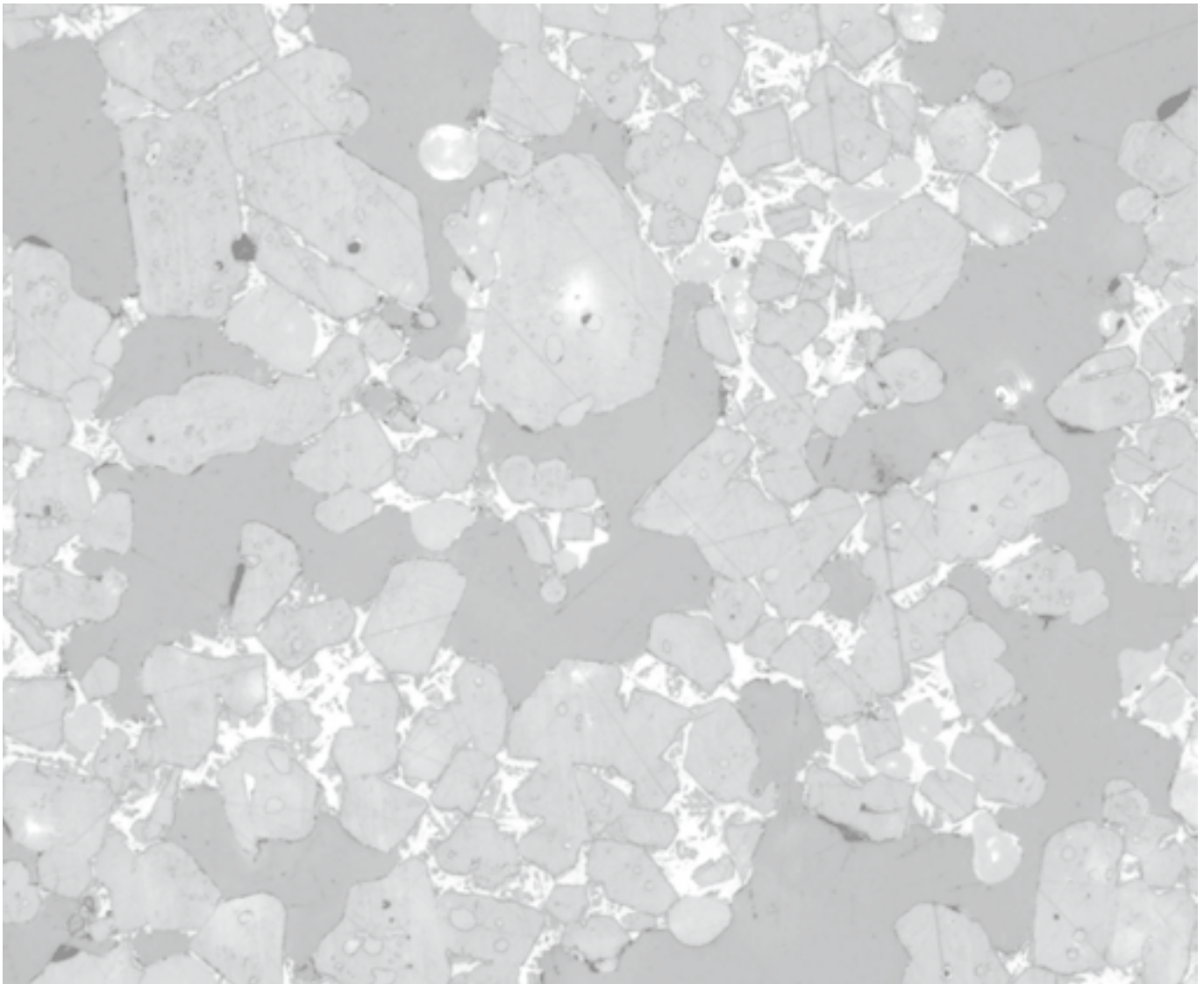
Ein Anwendungsbeispiel, bei dem beide Speziierungsverfahren parallel eingesetzt wurden, ist in **Bild II-16** dargestellt. Dabei wurden entsprechende Messungen an einer Drehofenanlage mit installiertem SCR-Denox-Katalysator durchgeführt. Die Messungen fanden im Verbundbetrieb unmittelbar vor Eintritt in den SCR-Katalysator, hinter der 1. Katalysatorschicht sowie im Reingaskamin hinter SCR-Katalysator statt.

Bei den Messungen wurde eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der UBA-Methode und dem Dowex-Jodkohle-Verfahren ermittelt. Dies gilt sowohl für die gemessene Gesamt-Quecksilberkonzentration als auch für die Aufschlüsselung in oxidiertes und elementares Quecksilber. Wie bereits aus dem Kraftwerksbereich bekannt, findet am SCR-Denox-Katalysator eine weitgehende Umwandlung des elementaren Quecksilbers in oxidierte Quecksilberverbindungen statt.

III

Leistungsfähigkeit von Zement

55



Lichtmikroskopische Aufnahme eines Anschliffs von Portlandzementklinker

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 von den Portlandzementen der unterschiedlichen Festigkeitsklassen nach DIN EN 197 die Mittelwerte sowie die Höchst- und Niedrigstwerte der chemischen Zusammensetzung aufgeführt.

Die Verlagerung der Marktanteile hin zu Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen führt zu einer breiten Produktpalette. Bei den CEM II werden neben den klassischen Sorten vermehrt Portlandkompositzemente produziert. Außer der dominierenden Kombination S-LL (Hüttensand und Kalksteinmehl) werden zunehmend auch Hauptbestandteile wie Steinkohlenflugasche oder gebrannter Ölschiefer verwendet. Aufgrund des derzeitigen Normenstatus sind für die umfassende Verwendung solcher Zemente noch bauaufsichtliche Anwendungszulassungen des Deutschen Instituts für Bau-

technik notwendig. **Tafel III-2** zeigt die mittlere chemische Zusammensetzung von Portlandpuzzolan-, Portlandkalkstein- und Portlandkompositzementen der deutschen Mitgliedswerke des VDZ im Berichtszeitraum.

Tafel III-3 fasst die chemische Zusammensetzung der Portlandhütten- und der Hochofenzemente zusammen (CEM II/A-S, CEM II/B-S, CEM III/A und CEM III/B). Nach wie vor sind die Zementtypen CEM III/C, CEM IV und CEM V im deutschen Markt von untergeordneter Bedeutung.

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

Festigkeitsklasse	Portlandzemente								
	32,5			42,5			52,5		
	Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max.
SiO ₂	19,04	20,73	22,92	18,64	20,63	23,18	18,96	20,86	23,53
Al ₂ O ₃	3,50	4,82	5,83	2,86	4,73	5,77	3,38	4,53	5,68
TiO ₂	0,19	0,26	0,30	0,11	0,25	0,30	0,09	0,24	0,50
P ₂ O ₅	0,04	0,19	0,60	0,03	0,19	0,54	0,02	0,19	0,45
Fe ₂ O ₃	1,35	3,06	6,58	0,16	2,93	7,06	0,15	2,49	5,45
Mn ₂ O ₃	0,04	0,07	0,10	0,02	0,07	0,19	0,02	0,06	0,19
CaO	60,41	63,20	65,91	59,72	63,56	66,37	61,41	64,44	67,82
MgO	0,83	1,61	3,39	0,59	1,52	3,80	0,57	1,31	3,27
SO ₃	2,34	2,99	3,77	1,96	3,03	3,79	2,22	3,20	3,98
K ₂ O	0,53	0,92	1,44	0,35	0,80	1,45	0,25	0,73	1,40
Na ₂ O	0,14	0,20	0,30	0,06	0,20	0,40	0,04	0,19	0,47
Na ₂ O _{Äquiv.}	0,51	0,81	1,17	0,35	0,73	1,21	0,25	0,67	1,26
Glühverlust	0,78	1,97	3,08	0,49	2,09	4,06	0,28	1,84	3,75

Tafel III-2: Chemische Zusammensetzung von Portlandpuzzolan-, Portlandkalkstein- und Portlandkompositzementen, Angaben in M.-%, glühverlusthaltig

Zementart	Portlandpuzzolan-, Portlandkalkstein- und Portlandkompositzemente														
	CEM II/B-P			CEM II/A-LL			CEM II/A-M (S-LL)			CEM II/B-M (S-LL)			CEM II/B-M (V-LL)		
	Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max.
SiO ₂	28,82	30,36	32,02	17,46	18,94	21,59	20,64	20,90	21,04	19,71	21,23	24,20	18,60	21,12	24,56
Al ₂ O ₃	6,94	8,06	8,56	3,29	4,62	6,14	5,07	5,35	5,72	4,61	5,46	6,41	4,73	6,01	7,23
TiO ₂	0,33	0,40	0,46	0,18	0,24	0,41	0,25	0,27	0,28	0,26	0,32	0,44	0,20	0,28	0,33
P ₂ O ₅	0,11	0,19	0,36	0,04	0,16	0,42	0,05	0,13	0,22	0,03	0,14	0,38	0,14	0,18	0,27
Fe ₂ O ₃	3,25	3,58	3,93	1,21	2,51	3,76	2,17	2,43	2,70	1,62	2,32	3,02	2,54	3,15	4,26
Mn ₂ O ₃	0,07	0,11	0,14	0,03	0,07	0,18	0,06	0,14	0,26	0,06	0,13	0,29	0,05	0,10	0,20
CaO	44,43	46,12	50,70	58,67	62,08	63,90	58,34	59,60	60,54	56,74	58,38	60,70	53,26	57,93	62,36
MgO	1,11	1,63	2,48	0,61	1,63	3,30	2,21	2,76	3,32	2,07	2,72	3,96	1,20	1,50	1,97
SO ₃	1,93	2,65	3,34	2,07	2,89	3,65	3,07	3,34	3,58	2,35	2,80	3,33	2,53	2,77	3,02
K ₂ O	1,06	1,91	2,71	0,41	0,86	1,46	0,91	0,95	0,99	0,47	0,92	1,34	0,45	0,88	1,46
Na ₂ O	0,53	0,84	1,20	0,08	0,17	0,32	0,19	0,30	0,37	0,13	0,21	0,32	0,16	0,21	0,28
Na ₂ O _{Äquiv.}	1,23	2,10	2,98	0,35	0,73	1,14	0,83	0,92	0,97	0,44	0,82	1,08	0,48	0,79	1,24
S ²⁻	n.b.	n.b.	n.b.	0	0,04	0,08	0,06	0,11	0,26	0,11	0,19	0,37	0,02	0,05	0,08
Glühverlust	3,35	4,15	5,11	3,16	5,89	7,87	3,27	3,79	4,11	2,93	5,26	7,24	5,32	5,87	6,35

n.b. = nicht bestimmt

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

Zementart	Portlandhütten- und Hochofenzemente											
	CEM II/A-S			CEM II/B-S			CEM III/A			CEM III/B		
	Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max.
SiO ₂	20,51	22,08	25,22	23,10	24,44	26,26	24,82	27,24	31,18	28,80	30,52	32,05
Al ₂ O ₃	4,79	5,73	6,51	5,30	6,31	7,94	5,46	7,57	9,34	7,82	8,84	9,80
TiO ₂	0,26	0,35	0,53	0,31	0,43	0,60	0,33	0,61	1,10	0,41	0,78	1,25
P ₂ O ₅	0,04	0,18	0,46	0,03	0,12	0,25	0,01	0,09	0,27	0,01	0,07	0,50
Fe ₂ O ₃	1,25	2,50	3,56	1,19	2,19	3,33	0,83	1,62	2,72	0,65	1,14	1,50
Mn ₂ O ₃	0,07	0,13	0,33	0,07	0,16	0,52	0,07	0,21	0,91	0,06	0,25	0,58
CaO	55,72	60,05	63,64	54,64	57,49	60,16	46,79	52,71	56,95	43,97	47,50	51,43
MgO	1,41	2,42	4,36	1,93	3,00	4,25	2,50	4,09	6,05	2,00	5,42	7,71
SO ₃	2,45	3,14	3,78	1,93	2,71	3,73	1,17	2,69	3,88	0,89	2,19	3,33
K ₂ O	0,43	0,88	1,36	0,44	0,73	1,23	0,47	0,75	1,16	0,44	0,71	1,08
Na ₂ O	0,11	0,23	0,42	0,15	0,24	0,39	0,14	0,25	0,44	0,19	0,28	0,49
Na ₂ O _{Aquiv.}	0,42	0,81	1,22	0,47	0,72	1,03	0,50	0,74	1,09	0,51	0,74	0,99
S ²⁻	0,07	0,20	0,41	0,13	0,35	0,61	0,28	0,59	0,99	0,48	0,85	1,12
Glühverlust	0,52	1,95	3,18	0,36	2,01	3,33	0,47	1,83	3,20	0,54	1,55	3,00

Quantitative Phasenanalyse von Zementen ■

Die quantitative Röntgenbeugungsanalyse gewinnt in den letzten Jahren in der Zementindustrie mehr und mehr an Bedeutung. In den meisten Werken steht diese Untersuchungsmethode mittlerweile zur Verfügung und wird auch zunehmend in die Laborautomation eingebaut. Die Auswertung der Messdaten beschränkt sich dabei zunehmend nicht nur auf einzelne überwachungsspezifische Parameter, wie z. B. den Freikalkgehalt im Klinker, sondern soll die vollständige Phasenanalyse ermöglichen.

Rietveld ist die Methode der Wahl

Als Auswerteverfahren hat sich die Methode nach Rietveld durchgesetzt, bei der ein Abgleich zwischen dem gemessenen und einem aus den Reflexen vorgegebener Mineralphasen berechneten Röntgenbeugungsdiagramm erfolgt. Darüber hinaus werden eine Vielzahl messtechnischer Kennwerte und Strukturparameter der Mineralphasen mathematisch in die Berechnung einbezogen. Gerade in komplexen Mineralgemischen mit verschiedenen Mineralen, Mischkristallen, Kristallinitätsgraden und Texturen kann eine solche Auswertung immer nur Näherungswerte der tatsächlichen Zusammensetzung liefern.

Die Gerätehersteller bieten Softwarelösungen an, die individuell für das Werk und die zu messenden Stoffsysteme erstellte Auswerteroutinen beinhalten. Durch die

immer wiederkehrende Messung und Auswertung von Ausgangsstoffen, Klinkern und Zementen lassen sich auf diesem Weg Veränderungen in der Phasenzusammensetzung der Materialien bereits mit hoher Genauigkeit ermitteln. In einigen Werken werden die Daten der röntgenographischen Phasenuntersuchungen mittlerweile nicht nur zur Kontrolle der laufenden Produktion, sondern teilweise auch zur Steuerung oder zur internen Güteüberwachung verwendet.

Nach wie vor anspruchsvoll ist die Bestimmung absoluter Phasengehalte. Ringversuche zur Bestimmung der Vergleichsgenauigkeit zeigen überwiegend unbefriedigende Ergebnisse. Die Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh) hat einen Arbeitskreis eingerichtet, der sich mit der Rietveld-Auswertung von Röntgenbeugungsmessungen an Portlandzementen und Portlandzementklinkern befasst. Durch den Erfahrungsaustausch von Fachleuten aus der Industrie, von Dienstleistungslaboren sowie von Verbänden und Hochschulen soll eine Verfahrensanleitung formuliert werden, deren Anwendung zu einer verbesserten Vergleichsgenauigkeit von Analysen unterschiedlicher Labore führt. Beginnend mit der Probenpräparation, den Geräteparametern, der Phasenidentifikation und der Wahl der Strukturparameter werden alle wesentlichen Bereiche einer quantitativen Röntgenbeugungsanalyse nach der Rietveld-Methode aufgegriffen. Aus Gründen der Praxisnähe werden zunächst nur Auswerteroutinen betrachtet, die keine manuelle

Nachbearbeitung erfordern. Erste arbeitskreisinterne Vergleichsuntersuchungen an Portlandzementen zeigen, dass allein schon aufgrund der Probenpräparation nach wie vor große Unschärfen auftreten. Analysen, die unter identischen Präparations-, Mess- und Auswertebedingungen durchgeführt wurden, z. B. Produktionskontrollen, lieferten hingegen präzisere Daten.

Analyse von Kompositzementen

Neben der Phasenanalyse am Klinker oder Portlandzement ermöglicht die quantitative Röntgenbeugungsanalyse prinzipiell auch die Beschreibung der Mischungszusammensetzung von Kompositzementen. Um dieses Ziel zu erreichen, muss das ohnehin schon komplexe Phasengemisch aus Klinker und Sulfatträgern noch um die Komponenten der weiteren Hauptbestandteile erweitert werden. Besonders anspruchsvoll wird es, wenn z. B. bei Hüttensand oder Flugasche röntgenamorphe („glasartige“) Komponenten zu berücksichtigen sind. Die moderne Auswertesoftware bietet auch hier Lösungsmöglichkeiten, z. B. über so genannte Pseudostrukturen. Die Ergebnisse solcher Berechnungen müssen allerdings sorgfältig bewertet und an Versuchsergebnissen aus konventioneller Analytik kalibriert werden. Im Rahmen eines angelaufenen AiF-Forschungsvorhabens (IGF-Nr. 17397 N) wird das Forschungsinstitut der Zementindustrie die derzeitigen Anwendungsmöglichkeiten der quantitativen Röntgenbeugungsanalyse zur Qualitätskontrolle bei der Zementproduktion daher umfassend untersuchen.

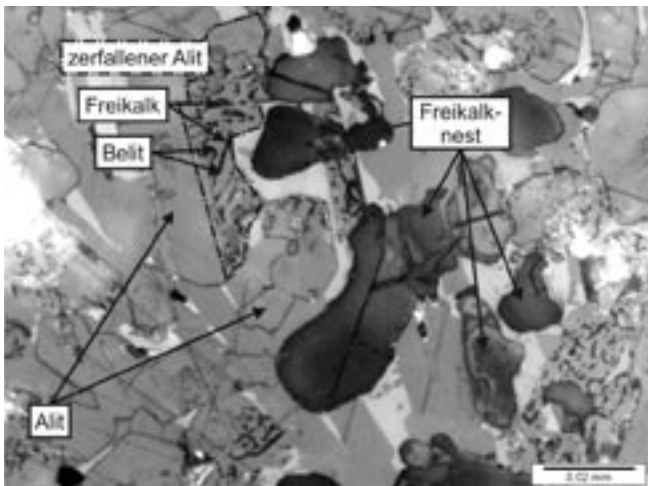


Bild III-1: Teils zu Belit und Freikalk zerfallene Alitkristalle in der Umgebung eines Freikalknests

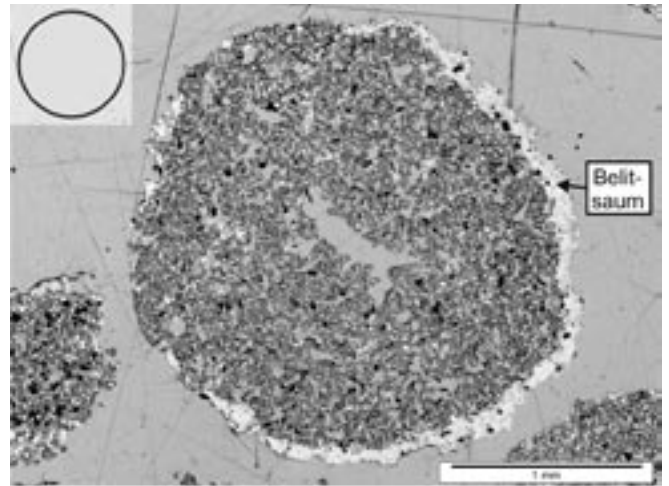


Bild III-2: Laborklinkergranalie mit dichtem Saum aus Belit, hergestellt aus Rohmehlgranalie mit Saum aus $\text{Al}(\text{OH})_3$ (schematische Darstellung oben links)

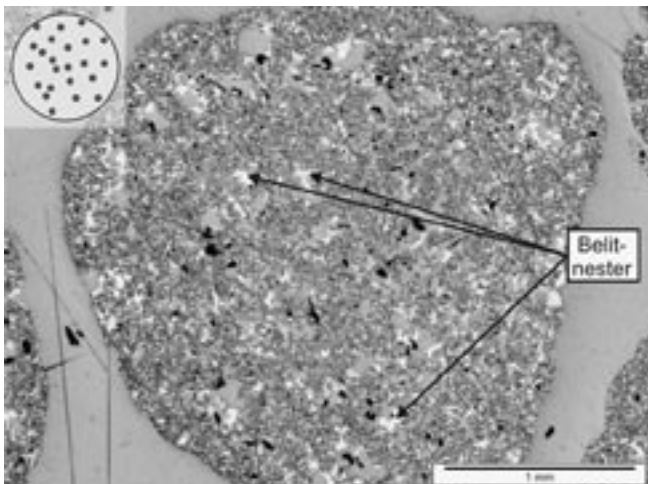


Bild III-3: Laborklinkergranalie aus Rohmehlgranalie mit Partikeln aus $\text{Al}(\text{OH})_3$ (schematische Darstellung oben links), Belitnester mit Poren (Pfeile) in der Größenordnung der $\text{Al}(\text{OH})_3$ -Partikel

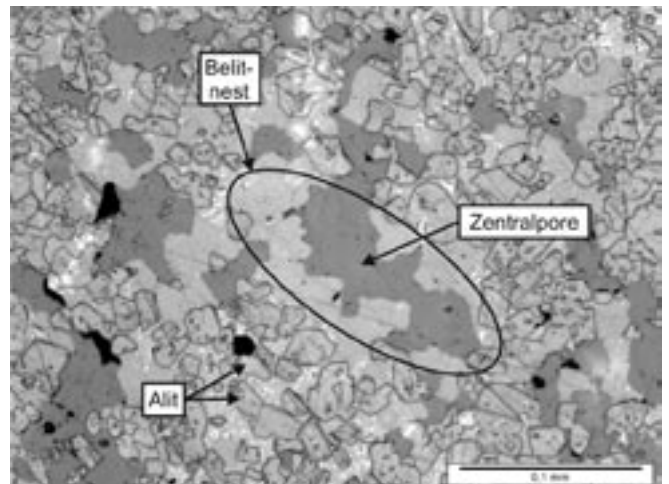


Bild III-4: Belitnest mit Zentralpore, Ausschnitt aus Bild III-3

Einfluss von Roh- und Brennstoffen auf die Klinkereigenschaften ■

Jeder Roh- und Brennstoff hat Auswirkungen auf den Klinkerbrennprozess und beeinflusst dadurch die Klinkereigenschaften. Da die Leistungsfähigkeit von Zementen wesentlich durch den Portlandzementklinker bestimmt wird, ist die kontinuierliche und detaillierte Überwachung der Klinkereigenschaften in der modernen Zementherstellung Stand der Technik. Um die Kenntnisse über den Einfluss alternativer Roh- und Brennstoffe auf Portlandzementklinker weiter zu vertiefen, wurden in den vergangenen Jahren im Forschungsinstitut der Zementindustrie ein Forschungsprojekt und verschiedene Untersuchungen an technischen Klinkern durchgeführt.

Rohstoffe mit Brennstoffeigenschaften

Im Gefüge eines technischen Klinkers wurden die Auswirkungen eines Materials untersucht, das im Klinkerbrennprozess als alternative Calciumquelle und als Brennstoff verwendet wurde.

In der untersuchten Klinkerprobe traten Verwachsungen aus Belit und Freikalk auf (Bild III-1), bei denen es sich um zerfallene Alitkristalle handelte. Diese Erscheinung ist ein typisches Anzeichen für reduzierende Brennbedingungen. Das Gefügemerkmal trat jedoch ungewöhnlicherweise ausschließlich in der direkten Nachbarschaft von Nestern aus Freikalkkristallen auf.

Durch ihren hohen Calciumgehalt bewirkten grobe Partikel des kombinierten Roh- und Brennstoffs in den Klinkergranalien die

Bildung von Freikalknestern im Klinker. Durch die Anteile an organischen Verbindungen, die für die Brennstoffeigenschaften des Materials verantwortlich waren, lagen in der direkten Umgebung grober Partikel in den Klinkergranalien reduzierende Bedingungen vor. Nur durch die Kombination der Rohstoff- und Brennstoffeigenschaften des Materials entstand die recht ungewöhnliche Gefügebildung, bei der zerfallener Alit ausschließlich an Freikalknestern vorlag.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde die Bedeutung einer schnellen Klinkerkühlung für die Auswirkungen reduzierender Bedingungen auf den Klinker deutlich. Die beschriebene Klinkerprobe war prozesstechnisch bedingt langsam gekühlt worden. In einer weiteren Klinkerprobe, die deutlich schneller gekühlt wurde, waren keine Anzeichen für reduzierende Bedingungen

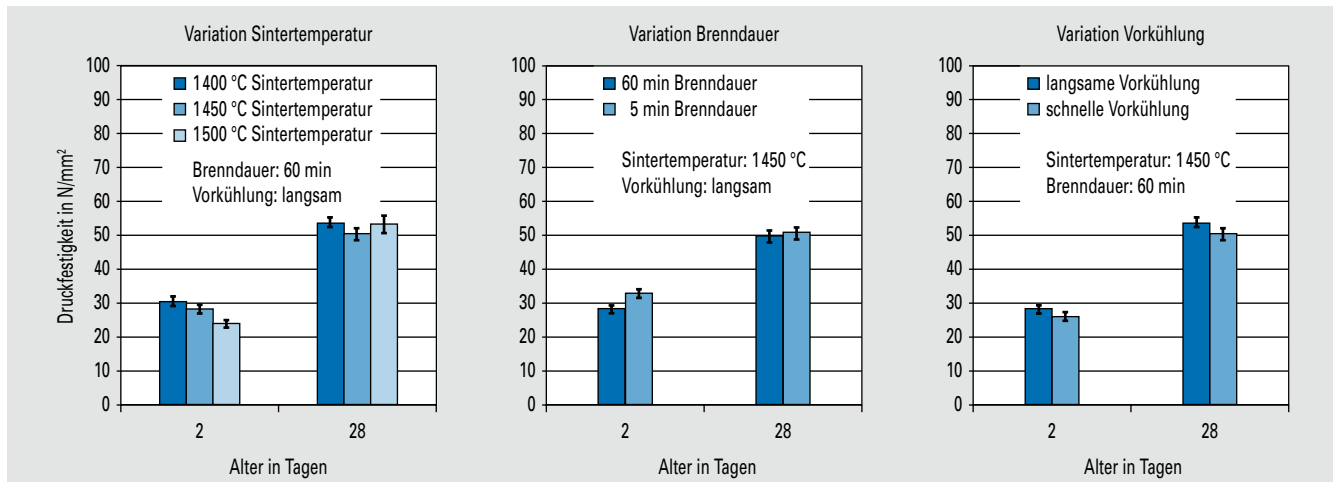


Bild III-5: Einfluss der Brenn- und Kühlbedingungen von Laborklinkern auf die Druckfestigkeiten daraus hergestellter Laborzemente

zu erkennen. Durch die schnellere Kühlung wurde somit einem Alitzerfall oder anderen Auswirkungen reduzierender Brennbedingungen vorgebeugt.

Al-reiche Asche

In einem AiF-Forschungsvorhaben (Nr. 15251 N) wurden die Auswirkungen künstlicher Brennstoffaschen auf das Gefüge von Laborklinkern untersucht. Ein Ziel war die Nachstellung der inhomogenen Verteilung von Aluminiumoxid im Brenngut durch grobe Al-reiche Aschepartikel oder durch die Anlagerung von Al-reichen Aschepartikeln auf der Oberfläche von Klinkergranalien. Al-reiche Aschen werden insbesondere durch bestimmte Sekundärbrennstoffe in den Klinkerbrennprozess eingebracht.

Um eine grobkörnige aluminiumreiche Brennstoffasche zu simulieren, wurden Partikel aus $\text{Al}(\text{OH})_3$ mit wenigen hundert µm Durchmesser einem Rohmehl zugegeben. Zur Nachstellung der Anlagerung aluminiumreicher Partikel an der Granalienoberfläche wurden Rohmehlgranalien mit einer äußeren Schicht aus $\text{Al}(\text{OH})_3$ -Pulver versehen. Zum Vergleich wurden auch Rohmehlgranalien mit homogener Zusammensetzung hergestellt. Die chemische Gesamtzusammensetzung aller drei Granalientypen war gleich.

Im Gefüge der aus allen Granalientypen hergestellten Laborklinker waren die aluminiumhaltigen Klinkerphasen C_3A und C_4AF homogen in den Klinkergranalien verteilt. In den aus Granalien mit $\text{Al}(\text{OH})_3$ -Saum bzw. homogen verteilten größeren $\text{Al}(\text{OH})_3$ -Partikeln hergestellten Klinkern wurden jedoch Säume (Bild III-2) bzw. Nester (Bilder III-3 und III-4) aus Belit

beobachtet. Die Belitnester hatten Durchmesser, die mit denen der zugegebenen $\text{Al}(\text{OH})_3$ -Partikel vergleichbar waren, und wiesen in der Regel Zentralporen auf. In dem Laborklinker, der aus dem homogenen Rohmehl hergestellt wurde, konnten derartige Belitnester oder -säume nicht festgestellt werden.

Beim Brennen hatten sich aus dem angereicherten $\text{Al}(\text{OH})_3$ und dem Calcium des Rohmehls Calciumaluminat und schließlich die Klinkerschmelze gebildet. Die Schmelze verteilte sich im Klinkergefüge. Am Ort ehemaliger $\text{Al}(\text{OH})_3$ -Partikel blieben Hohlräume zurück. Mit der Schmelze wurde jedoch auch ein Teil des Calciums entfernt, sodass sich im direkten Umfeld der $\text{Al}(\text{OH})_3$ -Säume und größeren $\text{Al}(\text{OH})_3$ -Partikel nur die calciumärmere Silicatphase, der Belit, nicht jedoch der calciumreichere Alit bilden konnte.

Inwieweit dieser im Labor beobachtete Effekt auch in technischen Klinkern auftritt, muss noch untersucht werden. Die Ergebnisse deuten jedoch darauf hin, dass Belitnester im Klinker nicht ausschließlich auf lokale SiO_2 -Anreicherungen zurückgeführt werden können. Auch Mechanismen, die zur lokalen Abreicherung von CaO führen, können das Klinkergefüge erkennbar beeinflussen. Röntgenbeugungsuntersuchungen an den Laborklinkern zeigten keine Veränderung in der mineralogischen Zusammensetzung im Vergleich zu dem Laborklinker, der aus homogenem Rohmehl hergestellt wurde. Dies ist nicht überraschend, da bei konstanter Gesamtmenge an Al_2O_3 die gleiche Gesamtmenge an Calciumaluminaten zu erwarten ist. Die Normeigenschaften von damit hergestellten Laborzementen wurden ebenfalls nicht beeinträchtigt.

Veränderte Temperaturprofile

Des Weiteren wurde untersucht, wie sich Veränderungen des Temperaturprofils und der Brenntemperaturen im Drehrohrföfen auf die Eigenschaften von Portlandzementklinker und damit hergestelltem Portlandzement auswirken können. Durch Unterschiede im Ausbrandverhalten verschiedener Brennstoffe können sich diese Parameter bei Verwendung neuer Stoffe verändern, da ggf. Flammenform und -temperatur beeinflusst werden.

Für die Untersuchungen wurden Laborklinker gleicher chemischer Zusammensetzung im Laborföfen unterschiedlichen Sintertemperaturen ausgesetzt (1400 °C, 1450 °C, 1500 °C) oder unterschiedlich lang bei gleicher Maximaltemperatur gebrannt (5 min, 60 min). Des Weiteren wurden Veränderungen in der Länge der Vorkühlzone im Drehrohrföfen nachgestellt, die sich zwischen dem heißesten Punkt der Flamme und dem Ofenauslauf erstreckt. Dazu wurden die Laborklinker teils bei Brenntemperatur aus dem Ofen entnommen und an Luft abgekühlt (schnelle Vorkühlung). Teils wurden die Laborklinker nach dem Brand so lange im Ofen belassen, bis dieser auf 1250 °C abgekühlt war (ca. 30 min), und erst danach entnommen und an Luft abgekühlt (langsame Vorkühlung).

Aus den so hergestellten Laborklinkern wurden durch Mahlung auf vergleichbare Feinheiten und Mischen mit einer vorgegebenen Menge und Zusammensetzung eines Sulfatträgers Laborzemente produziert. Aus diesen Zementen wurden unter anderem Miniprismen (1,5 cm x 1,5 cm x 6 cm) hergestellt, an denen Druckfestigkeiten im Alter von 2 und 28 Tagen bestimmt wurden.

Trotz der erheblichen Veränderungen der Brennbedingungen, denen die Laborklinker ausgesetzt waren, traten keine signifikanten Unterschiede in den 28-Tage-Druckfestigkeiten der daraus hergestellten Laborzemente auf (**Bild III-5**).

Die 2-Tage-Druckfestigkeiten waren jedoch bei Klinkern, die lange und/oder bei hohen Temperaturen gebrannt wurden, erkennbar geringer als bei Klinkern, die kurz bei mittleren bis niedrigen Temperaturen gebrannt wurden (**Bild III-5**). Die Variation der Vorkühlung wirkte sich dagegen nicht signifikant auf die 2-Tage-Druckfestigkeiten aus.

Bei der Beurteilung der Praxisrelevanz der Ergebnisse müssen jedoch die extremen Versuchsbedingungen berücksichtigt werden. Brennstoffbedingte Schwankungen in Brenntemperatur oder Sinterzonenzlänge sind in der Praxis geringer als in den Versuchen, in denen Extrembedingungen abgeprüft werden sollten.

Sulfatoptimierung von Zementen ■

Die Zeit bis zum Erstarrungsbeginn von Zement wird von den in der Anfangsphase reaktiven Zementkomponenten sowie deren Wechselwirkungen untereinander bestimmt. Die Abstimmung des Sulfatangebots insbesondere auf die Menge und Reaktivität des im Klinker vorhandenen Tricalciumaluminats (C_3A) spielt bei der Zementherstellung daher eine bedeutende Rolle. Nur bei optimalem Sulfatangebot sind Mörtel oder Betone ausreichend lange verarbeitbar.

Eine Sulfatträgeroptimierung kann durch die Messung der Erstarrungszeiten an im Labor hergestellten Zementen erfolgen. Hierfür werden dem zu optimierenden Klinker verschiedene Sulfatmengen in unterschiedlichen Anteilen an Gips, Anhydrit oder Halbhydrat zugesetzt und anschließend der Erstarrungsbeginn der Proben mit einem Penetrometer bestimmt. Anders als beim Vicat-Verfahren nach DIN EN 196-3 wird hierbei eine Nadel mit einem Durchmesser von 3 mm verwendet, wodurch eine besser aufgelöste Darstellung der Erstarrungszeiten ermöglicht wird. Zudem wird für die Penetrometerversuche deutlich weniger Zement benötigt.

Statistische Versuchsplanung

Sulfatträgeroptimierungen sind durch die hohe Anzahl nötiger Versuche meist sehr aufwendig. In der Regel wird für eine Sulfatträgeroptimierung zunächst bei festge-

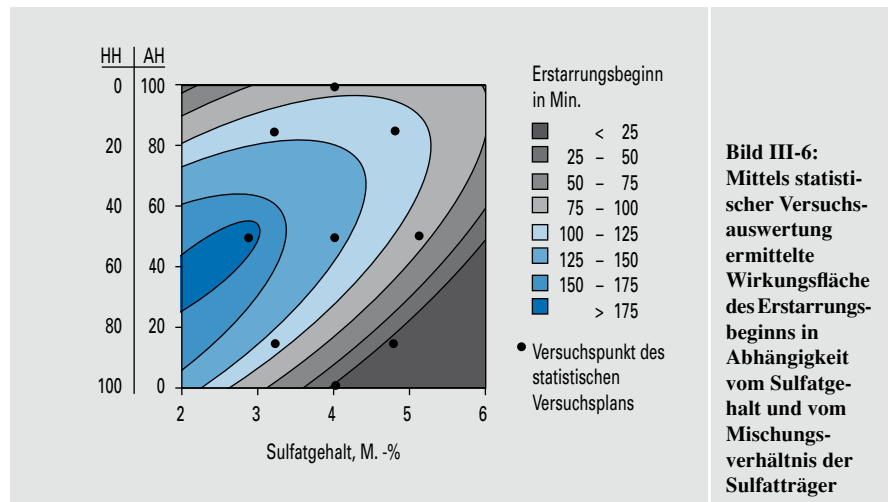


Bild III-6: Mittels statistischer Versuchsauswertung ermittelte Wirkungsfläche des Erstarrungsbeginns in Abhängigkeit vom Sulfatgehalt und vom Mischungsverhältnis der Sulfatträger

legtem Sulfatgehalt der Einfluss des Mischungsverhältnisses von Anhydrit zu Halbhydrat auf die Verarbeitbarkeit des Zements untersucht. Im nächsten Schritt wird dann bei festen Mischungsverhältnissen der Sulfatträger der Einfluss des Sulfatgehalts bestimmt. Mithilfe der Methoden der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments – DoE) kann die Anzahl der zur Sulfatträgeroptimierung notwendigen Versuche deutlich verringert werden und optimale Mischungen können schneller ermittelt werden. Hierfür wird mittels statistischer Versuchsplanung ein zentral zusammengesetzter Versuchsplan erstellt, mit dem eine Wirkungsfläche berechnet werden kann, die den Zusammenhang zwischen der Verarbeitbarkeit des Zements, seinem Sulfatgehalt und der Sulfatträgermischung darstellt.

Vorgehensweise

Zur Sulfatträgeroptimierung eignet sich ein orthogonaler zentral zusammengesetzter Versuchsplan, der die Faktoren Sulfatgehalt im Zement und Mischungsverhältnis Anhydrit/Halbhydrat berücksichtigt. Entsprechend den Vorgaben des statistischen Versuchsplans (s. Punkte in **Bild III-6**) werden dann Zemente aus Portlandzementklinker, ggf. weiteren Hauptbestandteilen und Anhydrit (AH) und/oder Halbhydrat (HH) als Sulfatträger hergestellt. Hierfür hat sich die Homogenisierung der Proben in einer Keramikmühlmühle als optimal herausgestellt.

Vor Beginn der Penetrometermessungen muss der Wasserbedarf der zu optimierenden Zemente bestimmt werden. Dies erfolgt nach einem an die DIN EN 196-3 angelehnten Verfahren, das speziell für die Bestimmung des Wasseranspruchs bei kleinen Probenmengen entwickelt wurde. Anschließend wird der Erstarrungsbeginn der Zementleime mit dem Penetrometer ermit-

telt und die Versuchsergebnisse statistisch ausgewertet. **Bild III-6** zeigt beispielhaft eine mithilfe der statistischen Versuchsauswertung erzeugte Wirkungsfläche des Erstarrungsbeginns in Abhängigkeit vom Sulfatgehalt und vom Mischungsverhältnis der Sulfatträger Anhydrit und Halbhydrat. Aus dem Bild geht hervor, dass der Bereich des Optimums sowohl für die Zugabemenge als auch für die Anteile der Sulfatträger im Gemisch mit neun Versuchen bereits deutlich eingegrenzt werden konnte. Mit weiteren Versuchen kann anschließend das Erstarrungsverhalten des Zementleims in diesem Zusammensetzungsbereich tiefer gehend untersucht und dann die optimale Zusammensetzung des Zements hinsichtlich Sulfatträgermenge und -zusammensetzung festgelegt werden.

Mit der beschriebenen Vorgehensweise ist eine Sulfatträgeroptimierung des Zements bezüglich weiterer Parameter, wie der Druckfestigkeit nach DIN EN 196-1 oder der isothermen Hydrationswärmeabgabe, ebenfalls möglich.

Beeinflussung der Wirksamkeit von Chromatreduzieren ■

Zur Chromatreduktion von Zement und zementhaltigen Zubereitungen wird häufig Zinn(II)-sulfat eingesetzt. In der Praxis wurde jedoch festgestellt, dass die Gehalte an wasserlöslichem Chromat von Zementen mit zugesetztem Zinn(II)-sulfat teilweise bereits nach wenigen Monaten wieder deutlich ansteigen können. Zur Klärung der Ursache wurden im Forschungsinstitut die chromatreduzierende Wirkung sowie oberflächliche Veränderungen und Phasenumwandlungsreaktionen verschiedener Zinn(II)-sulfat-Präparate über einen Zeitraum von neun Monaten untersucht.

Langzeit-Wirksamkeit

Für die Untersuchungen wurden Mischungen eines Zements CEM I 42,5 R mit rd. 14 ppm wasserlöslichem Chromat mit verschiedenen Zinn(II)-sulfat-Präparaten hergestellt. Die Präparate unterschieden sich durch ihre Gehalte an Restfeuchte und Restschwefelsäure, ihre Vorlagerungsbedingungen sowie die Korngröße und Morphologie.

Alle untersuchten Chromatreduzierer zeigten während der Lagerzeit von neun Monaten eine Abnahme ihrer Wirksamkeit, d. h. die gemessenen Gehalte an wasserlöslichem Chromat stiegen im Laufe der Zeit an. Die Wirksamkeit grobkörniger Zinn(II)-sulfat-Präparate ließ kontinuierlich über die Lagerzeit nach. Die feinkörnigen Zinn(II)-sulfat-Präparate zeigten eine gute Reduktionswirkung über einen Zeitraum von sechs Monaten. Danach nahm ihre Wirksamkeit jedoch auf ein den anderen Präparaten vergleichbares Niveau ab.

Oberflächenreaktionen

Um zu klären, ob chemische Reaktionen für den Wirksamkeitsverlust verantwortlich sind, wurde das Verhalten von zwei industriell produzierten Zinn(II)-sulfat-Präparaten genauer untersucht. Das feinkörnige Präparat wies eine BET-Oberfläche von rd. $1,2 \text{ m}^2/\text{g}$, eine Restfeuchte von 0,4 M.-% und eine Restschwefelsäure von 0,3 M.-% auf. Die Partikel waren meist rundlich abgeflacht und bildeten Agglomerate mit Durchmessern zwischen ca. 5 und $30 \mu\text{m}$ (**Bild III-7**). Das grobkörnigere Präparat wies eine BET-Oberfläche von ca. $0,05 \text{ m}^2/\text{g}$ auf und enthielt weniger als 0,1 M.-% Restfeuchte und weniger als 0,1 M.-% Restschwefelsäure. Die Partikel waren meist idiomorph nadelig mit Längen zwischen 20 und $200 \mu\text{m}$ (**Bild III-8**).

Für die Untersuchungsreihen wurden Mischungen eines Portlandzements CEM I 42,5 R mit jeweils einem Zinn(II)-sulfat-Präparat in Mischungsanteilen von 80 M.-% Zement und 20 M.-% SnSO_4 hergestellt. Zinn(II)-sulfat-Partikel der beiden Mischungen wurden monatlich mittels Röntgendiffraktometrie und Rasterelektronenmikroskopie untersucht. Zusätzlich wurden die Mischungen nach einer Lagerzeit von neun Monaten mithilfe der Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) charakterisiert. Hierbei handelt es sich um eine Methode zur Oberflächenanalyse, die Informationen über die Elementzusammensetzung und über den chemischen Bindungszustand der vorhandenen Elemente liefert. Durch den unüblich hohen Anteil des Zinn(II)-sulfats in den Mischungen wurde sichergestellt, dass bei den REM-

Bild III-7:
Feinkörniges
Zinn(II)-sulfat

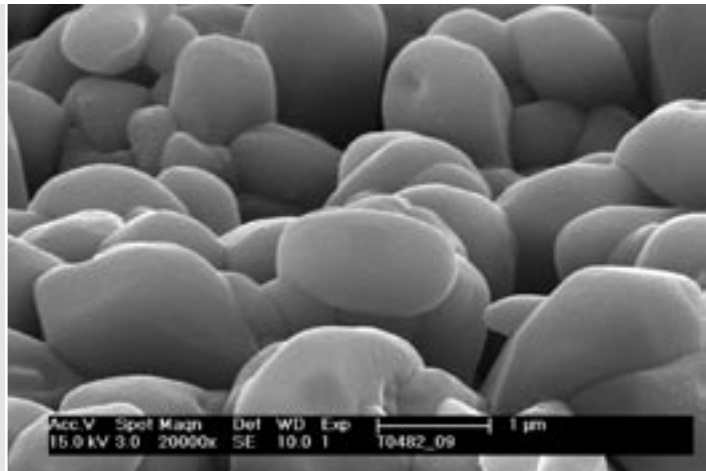


Bild III-8:
Grobkörniges
Zinn(II)-sulfat

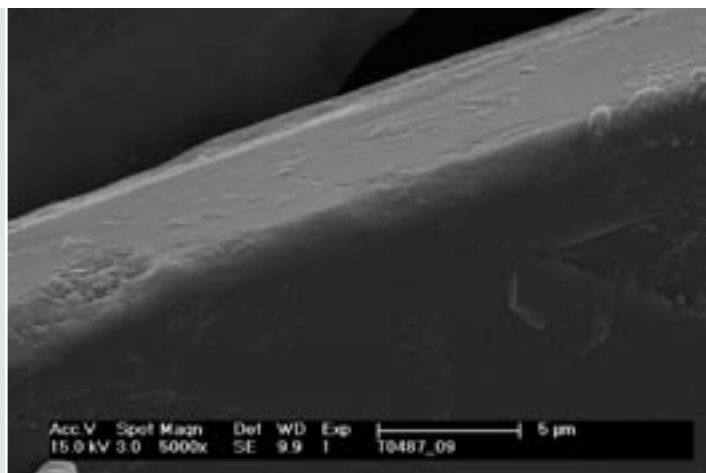
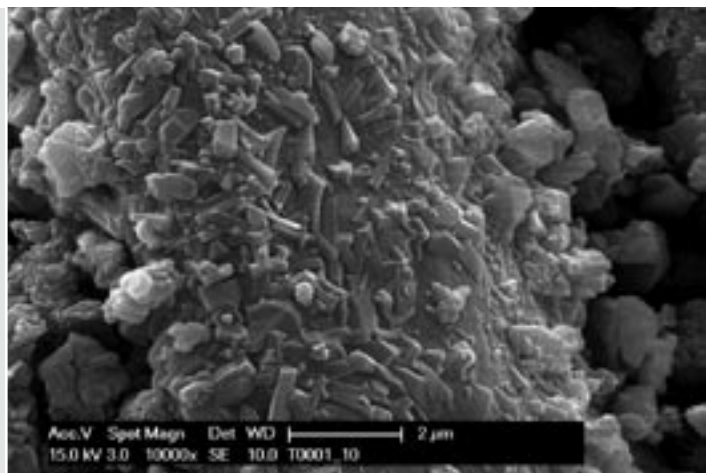


Bild III-9:
Oberfläche von
 SnSO_4 nach
7 Monaten
Lagerzeit in
einer Mischung
mit Zement



Untersuchungen Zinn(II)-sulfat-Partikel in ausreichender Anzahl beobachtet werden konnten und gleichzeitig genügend Zement für mögliche Wechselwirkungen vorhanden war. Außerdem sollte der hohe Zinn(II)-sulfat-Anteil den Nachweis etwaiger Phasenumwandlungen mittels Röntgendiffraktometrie erleichtern.

Bei den Untersuchungen zeigte sich, dass Zinn(II)-sulfat in Zement chemischen Umwandlungsprozessen unterliegt. Hierbei bil-

den sich zunächst dünne Schichten aus verschiedenen schwerlöslichen Zinn(IV)-Verbindungen auf der Oberfläche der SnSO_4 -Partikel (**Bild III-9**). Dadurch kann deren Auflösung bei der Verarbeitung des Zements bzw. bei der Prüfung hinsichtlich des Gehalts an wasserlöslichem Chromat gehemmt sein. Überraschenderweise lief die Umwandlung der untersuchten grobkörnigen Partikel schneller ab als die des feinkörnigeren Materials. Mit zunehmender Lagerzeit schreiten die chemischen Reak-

tionen weiter fort, bis Zinn(II)-sulfat vollständig in Zinn(IV)-Verbindungen umgewandelt ist.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen also eindeutig, dass Zinn(II)-sulfat in Zement chemischen Umwandlungsprozessen unterliegt. Freikalk, Feuchtigkeit und die produktionstechnisch bedingte Morphologie der Zinn(II)-sulfat-Partikel beeinflussen die Geschwindigkeit der entsprechenden Reaktionen und damit die chromatreduzierende Wirksamkeit des Zinn(II)-sulfats. In Anbetracht der vielen Einflussparameter ist eine Prognose bezüglich der Wirksamkeit eines bestimmten Chromatreduzierers in Zement kaum möglich. Deshalb sind Bestimmungen des Gehalts an wasserlöslichem Chromat unabdingbar. In der Praxis hat sich bewährt, den erwarteten Wirksamkeitsverlust durch eine entsprechende Überdosierung an Zinn(II)-sulfat zu kompensieren. Auf diese Weise kann die Chromatreduktion bei sachgerechter Lagerung bis zum festgelegten Haltbarkeitsdatum gewährleistet werden.

Referenzmaterialien und Referenzzemente ■

Referenzmaterial zur Chlorbestimmung

Mit zunehmender Vielfalt und steigendem Einsatz von Sekundärbrennstoffen werden an die Analytik dieser Stoffe zunehmend höhere Anforderungen gestellt. Die Chlorbestimmung ist dabei besonders bei der Verbrennung von Kunststoffen ein zentraler Parameter. Auf Initiative des VDZ-Arbeitskreises Analytische Chemie wurde in Zusammenarbeit mit Kunststoffherstellern ein Referenzmaterial zur Bestimmung von Chlor in Sekundärbrennstoffen beschafft. Dabei handelt es sich um ein Polymer, dem durch gezielte Zugabe von PVC Chlor in definierter Menge homogen zudosiert wurde.

Im Herbst 2010 wurde in Zusammenarbeit mit der Gütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe und Recyclingholz e. V. (BGS) ein Ringversuch durchgeführt. Dabei bestimmten 43 Prüflaboratorien den Chlorgehalt und den Brennwert des unaufbereiteten Materials. Der mittlere Chlorgehalt des Referenzmaterials liegt bei ca. 0,8 M.-%, der mittlere Brennwert beträgt ca. 39 200 kJ/kg. Das Material kann beim VDZ käuflich erworben werden.

Referenzmaterial zur Chromatbestimmung

Der VDZ-Arbeitskreis Analytische Chemie arbeitete im Berichtszeitraum auch an der Entwicklung eines Referenzmaterials

für die Bestimmung wasserlöslichen Chromats in Zementen. Zu diesem Zweck wurde ein nebenbestandteilsfreier, nicht reduzierter CEM I-Zement ausgewählt und eingehend durch die Mitglieder des Arbeitskreises analysiert. Dabei wurde auch seine Lagerstabilität untersucht. In einem Ringversuch soll 2012 der Chromatgehalt des Zements von den Laboren der Zementindustrie bestimmt werden, damit dieser anschließend als Referenzzement zur Chromatbestimmung zur Verfügung gestellt werden kann.

AKR-Prüfzement

Zur Prüfung der Alkalireaktivität von Gesteinskörnungen nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie wird Prüfzement mit einem hohen Alkaligehalt verwendet. Um Schwankungen zwischen verschiedenen Laboren bei diesen Bestimmungen zu reduzieren, sollen alle Prüflabore den gleichen Zement verwenden. Der VDZ stellt deshalb einen einheitlichen AKR-Prüfzement mit zusätzlichen Informationen zu den Zementeigenschaften zur Verfügung und gibt an, was bei der Verwendung des Zements zu beachten ist.

Reaktivität von Zementhauptbestandteilen ■

Im Jahr 2011 wurden in Deutschland rd. 68 % aller Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen hergestellt. Damit dieser Trend erfolgreich fortgesetzt werden kann, ist gerade für die Herstellung von leistungsfähigen Zementen mit hohen Anteilen an weiteren Hauptbestandteilen neben Klinker ein tiefer gehendes Verständnis der Reaktionen der eingesetzten Zementbestandteile in der Zementsteinmatrix unerlässlich. Im Berichtszeitraum beschäftigten sich daher mehrere Forschungsprojekte mit der Herstellung und Verbesserung der Eigenschaften von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen.

Steinkohlenflugasche als Zementhauptbestandteil

In einem von der AiF geförderten Forschungsvorhaben (IGF-Nr. 16206 N) wurden die Hydratationsreaktionen von acht verschiedenen Steinkohlenflugaschen grundlegend untersucht und so Rückschlüsse auf ihre Reaktivität gezogen. Die chemische Zusammensetzung sowie die Dichte und die granulometrischen Eigenschaften der verwendeten Steinkohlenflugaschen sind in **Tafel III-4** aufgeführt.

Suspensionsversuche

Durch Suspendierung von Steinkohlenflugaschen bzw. von Steinkohlenflugasche-

Calciumhydroxid-Gemischen in verschiedenen Prüflösungen konnte die Korrosion der Aschen beschleunigt und so ihre Hydratationsreaktionen im Zeitraffer untersucht werden. Bei Suspendierung in einer alkalischen Prüflösung bestehend aus 0,54 mol/l KOH und 0,11 mol/l NaOH, die im Wesentlichen einer Porenlösung eines CEM I-Zements entsprach, wurde in die Reaktionsprodukte der Flugaschen mehr Kalium als Natrium eingebunden. Der Aluminiumgehalt im Eluat der Steinkohlenflugasche-Calciumhydroxid-Gemische war umso geringer, je mehr Sulfat eine Asche enthielt. Das Aluminium wurde, wenn ausreichend Sulfat zur Verfügung stand, für die Bildung von Aft- bzw. AFm-Phasen benötigt und war daher nicht mehr im Eluat gelöst.

Hydratationsprodukte

Die isolierte Untersuchung von in zementären Systemen gebildeten Reaktionsprodukten von Steinkohlenflugaschen ist praktisch nicht möglich. Um entsprechende Hydratationsprodukte von Steinkohlenflugaschen zu erhalten, wurden daher Aschen mit unterschiedlichen Gehalten an Calciumhydroxid gemischt und hydratisiert. So wurde die Reaktion von Steinkohlenflugasche in Zementen nachgestellt. Die dabei entstandenen Hydratationsprodukte wurden mit verschiedenen Methoden untersucht. Sofern die Aschen ausreichend Sulfat enthielten, entstand Ettringit. Daneben bildeten die Steinkohlenflugaschen als kristalline Reaktionsprodukte Mono- und Hemicarboaluminat sowie teilweise Strätlingit. Mit steigendem Wasser-Feststoff-Verhältnis erhöhte sich der Umsatz der puzzolanischen Reaktion und mehr Calciumhydroxid wurde verbraucht.

Des Weiteren wurde auch die Reaktion der Steinkohlenflugaschen in flugaschehaltigen Zementen untersucht. Die Zemente wurden im Labor durch intensives Mischen der jeweiligen Asche mit einem CEM I-Zement (vgl. **Tafel III-4**) hergestellt. Mittels Röntgenbeugungsanalyse wurde die Bildung verschiedener Carboaluminat festgestellt. Deren Art (Mono- bzw. Hemicarboaluminat) war von der chemischen Zusammensetzung der Steinkohlenflugaschen abhängig. **Bild III-10** zeigt das Gefüge eines CEM II/B-V-Zements mit 30 M.-% Steinkohlenflugasche nach einer Hydratationszeit von 28 Tagen in 5000-facher Vergrößerung. Besonders deutlich sind die Reaktionsprodukte der Steinkohlenflugaschen zu erkennen. Die Bildung festigkeitsrelevanter Produkte durch die Reaktion der Flugaschen war zwischen den Prüfaltern 7 und 28 Tagen am stärksten. Mit zunehmendem Aschegehalt in den Zementen wur-

Tafel III-4: Chemische Zusammensetzung sowie granulometrische Parameter der Steinkohlenflugaschen und des für die Herstellung flugaschehaltiger Zemente verwendeten Portlandzements

Komponente	Einheit	A1	A2	A7	A8	A10	A11	A13	A14	CEM I
Glühverlust		4,89	2,58	2,28	3,27	2,88	7,12	3,77	4,20	3,02
Silicium(IV)-oxid		40,96	39,48	45,07	50,48	51,82	50,17	51,57	48,72	20,07
Aluminiumoxid		26,56	22,56	28,31	30,25	24,86	24,12	26,83	28,90	4,34
Eisen(III)-oxid		9,98	14,27	12,13	6,04	7,30	6,22	6,65	4,66	2,54
Calciumoxid		7,73	11,28	2,14	0,75	5,74	3,31	3,62	7,47	64,02
Natriumoxid		1,48	1,04	1,40	1,13	0,66	1,03	0,85	0,17	0,18
Kaliumoxid		1,79	2,28	3,25	3,92	1,97	3,74	3,07	0,60	1,15
Phosphor(V)-oxid		0,94	0,06	0,58	0,44	0,94	1,13	0,58	1,06	0,07
Magnesiumoxid		3,82	3,02	2,58	1,92	1,93	1,76	1,65	1,45	1,44
Mangan(III)-oxid		0,21	0,21	0,18	0,08	0,09	0,07	0,06	0,06	0,04
Titandioxid		1,09	0,81	1,14	1,26	1,14	1,07	1,24	1,64	0,19
Sulfat als SO ₃		0,65	2,09	0,94	0,40	0,67	0,22	0,34	0,26	3,66
Freikalk		1,27	1,10	0,39	n.n.	0,82	0,14	0,22	0,89	n.n.
Reaktives SiO ₂		33,8	33,8	36,5	44,3	39,0	44,1	40,6	34,1	n.b.
Dichte	g/cm ³	2,70	2,79	2,64	2,53	2,20	2,36	2,58	2,64	3,12
x' (RRSB-Vert.)	µm	27,27	32,04	25,46	13,20	32,42	26,01	27,79	36,39	12,41
n (RRSB-Vert.)	—	0,77	0,87	0,80	1,10	0,90	0,70	0,80	0,88	0,87

n.n. = nicht nachweisbar

n.b. = nicht bestimmt

de das Gefüge der hydratisierten Proben lockerer und die Menge der puzzolanisch reagierten Flugaschepartikel verringerte sich.

Umsatzbestimmungen und Druckfestigkeiten

Durch Methanol-Salicylsäure-Salzsäure-(MSS-)Aufschlüsse der hydratisierten Zementsteine konnte der Umsatz der jeweiligen Steinkohlenflugasche im zementären System bestimmt werden. Der Umsatz der Aschen in Zementsteinen mit 30, 50 bzw. 70 M.-% Steinkohlenflugasche lag nach 7 Tagen Hydratation zwischen 15 und 27 % und nach 28 Tagen zwischen 21 und 39 %. Mit zunehmendem Aschegehalt im Zement sank der jeweilige Ascheumsatz. Dies ist im Wesentlichen auf den sinkenden pH-Wert der Porenlösung und fehlende Reaktionspartner in den Systemen mit hohem Aschegehalt zurückzuführen und erklärt die mit zunehmendem Flugascheanteil ansteigende Porosität der Zementsteine.

Der Einfluss, den die chemische Zusammensetzung der Flugaschen auf ihren Festigkeitsbeitrag im Zement hatte, erhöhte sich mit steigendem Flugaschegehalt im Zement. Generell beeinflussten die Gehalte an reaktivem SiO₂, Al₂O₃, Na₂O und K₂O der Steinkohlenflugaschen die Druckfestigkeit flugaschehaltiger Zemente positiv. Reaktives CaO wirkte sich dagegen negativ auf die Druckfestigkeit aus (vgl. **Bild III-11**).

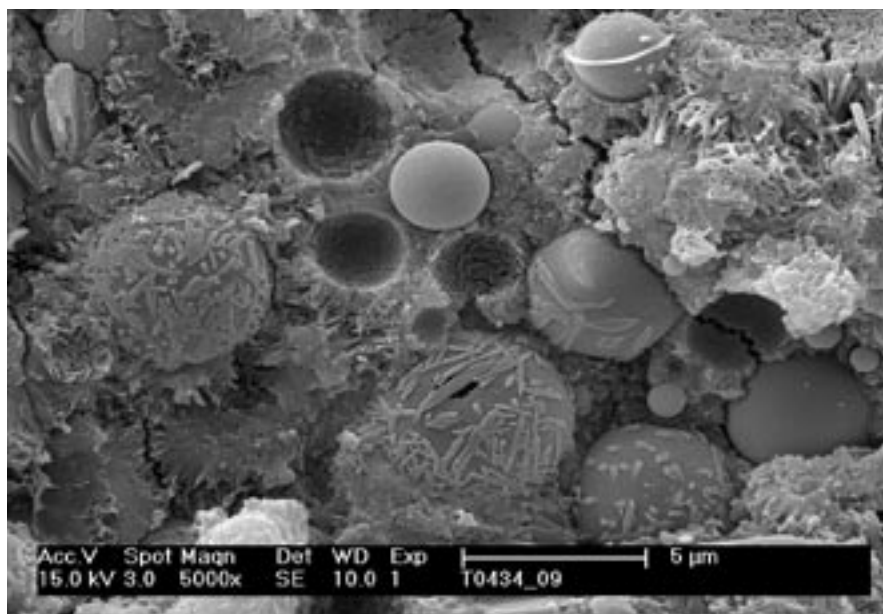


Bild III-10: CEM II/B-V mit 30 M.-% Steinkohlenflugasche A8 nach 28 Tagen Hydratation mit einem w/z-Wert von 0,50; Bruchfläche in 5000-facher Vergrößerung

Hydratation von Steinkohlenflugaschen mit mineralischen Zusätzen

Die Zugabe verschiedener mineralischer Zusätze zu flugaschehaltigen Zementen und die Mischung verschiedener Aschen beeinflusste die Hydratation dieser Systeme teilweise stark. Die Zugabe von 5 M.-% Natriumsulfat wirkte sich bei Zementen mit sulfatarmen Aschen positiv auf den Festigkeits-

verlauf aus. Die Zugabe von je 5 M.-% eines aluminiumhaltigen Stoffes (z. B. Aluminiumsulfat oder Metakaolin) war bei Zementen mit calciumreichen Aschen wirkungsvoller als bei solchen mit aluminium- und siliciumreichen Aschen. Zudem konnte festgestellt werden, dass die Mischung einer calciumreichen (A2) mit einer calciumarmen Asche (A7) zu gleichen Teilen hinsichtlich der Festigkeitsentwick-

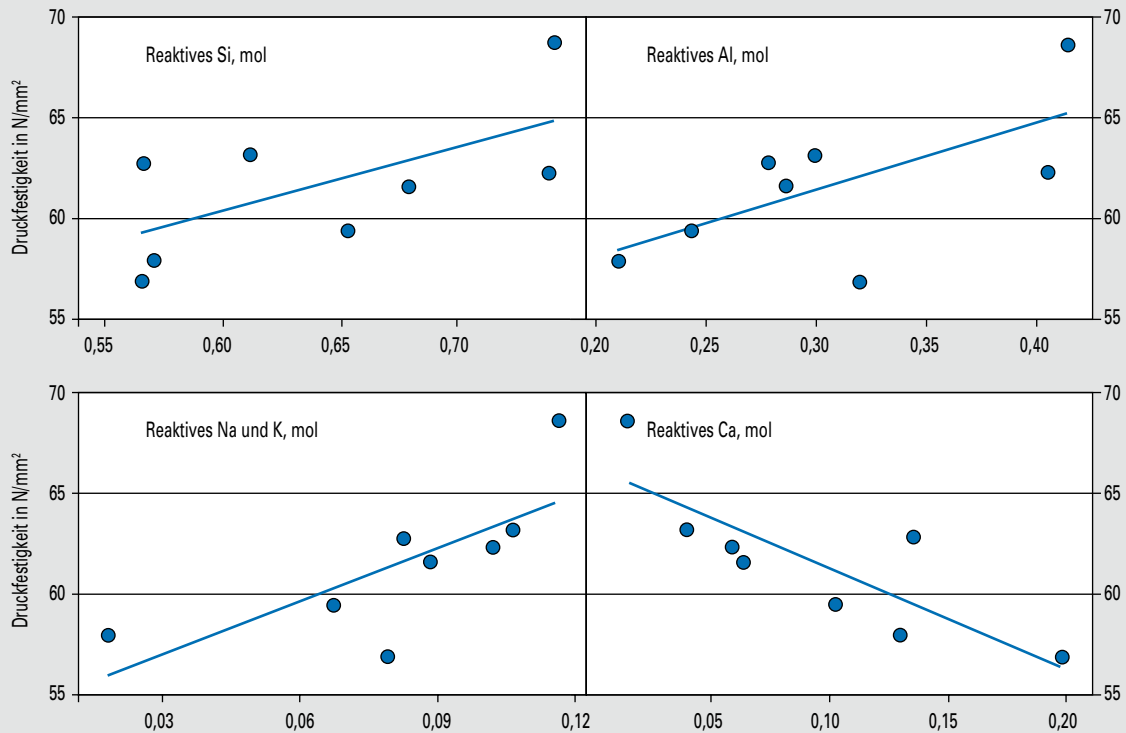


Bild III-11: Druckfestigkeit der CEM II/B-V-Zemente mit 30 M.-% Steinkohlenflugasche im Alter von 91 Tagen in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung der Flugasche

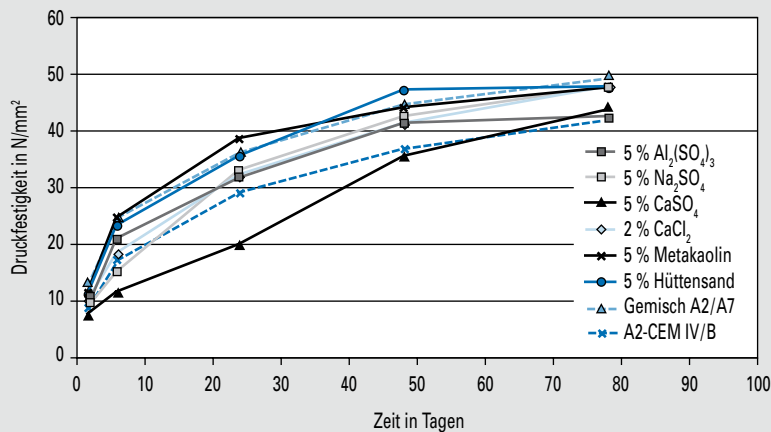


Bild III-12: Festigkeitsentwicklung nach DIN EN 196-1 von CEM IV-Zementen mit 50 M.-% Steinkohlenflugasche A2 mit verschiedenen mineralischen Zusätzen sowie von CEM IV-Zementen mit 25 M.-% Steinkohlenflugasche A2 und 25 M.-% Steinkohlenflugasche A7

lung ähnlich wirkungsvoll wie die Zugabe von Zusätzen war (vgl. **Bild III-12**).

Getempertter Ton als Zementhauptbestandteil

Getemperte Tone können nach den Vorgaben der DIN EN 197-1 als puzzolanischer Zementhauptbestandteil eingesetzt werden,

wenn sie einen Gehalt an reaktiver Kieselsäure von mindestens 25 M.-% aufweisen. Ziel des im Berichtszeitraum durchgeführten AiF-Forschungsvorhabens (IGF-Nr. 16566) war die Herstellung von calcinierten Tonen, die für den Einsatz als Zementhauptbestandteil geeignet sind. Außerdem sollte die Leistungsfähigkeit dieser Tone als

Zementhauptbestandteil ermittelt und bewertet werden.

Für das Forschungsprojekt wurden 15 verschiedene Tone aus deutschen Tonlagerstätten ausgewählt und umfassend charakterisiert. Die mineralogische Zusammensetzung der Tone ist in **Tafel III-5** angegeben. Geringe Mengen der Tone wurden mit unterschiedlichen Brennbedingungen (Variation der Brenndauer und -temperatur) getempert und danach chemisch-mineralogisch charakterisiert. Nach Festlegung der optimalen Brennbedingungen für jeden Ton, bei denen ein möglichst hoher Anteil an reaktiven Bestandteilen gebildet wurde, erfolgte das Tempern größerer Tonmengen. Die Proben wurden anschließend auf möglichst gleichmäßige Feinheit aufgemahlen und CEM II/A-Q-Zemente mit jeweils 20 M.-% getempertem Ton und CEM IV/B-Zemente mit jeweils 40 M.-% getempertem Ton im Labor hergestellt. Als Klinkerkomponente wurde hierfür ein CEM I-Zement genutzt, der den Anforderungen an einen Prüfzement nach DIN EN 450-1 entsprach.

Getemperte Tonproben

Die Phasenveränderung der Tonproben während des Brennvorgangs war gut mittels Röntgenbeugungsanalyse (RBA) nachvollziehbar. **Bild III-13** zeigt beispielhaft die

Tafel III-5: Mittels Röntgenbeugungsanalyse abgeschätzte mineralogische Phasenbestände der verwendeten Tonproben sowie Angaben zu ermittelten Brennbedingungen (Temperatur und Brenndauer) und den dazugehörigen Gehalten an reaktiver Kieselsäure, M.-%

	Ton 1	Ton 2	Ton 3	Ton 4	Ton 5	Ton 6	Ton 7	Ton 8	Ton 9	Ton 10	Ton 11	Ton 12	Ton 13	Ton 14	Ton 15
Quartz	+	S	S	S	+	+	++	+	++	?	+++	++	++	+	+
Microlin	?	S	–	–	–	–	S	S	–	–	S	S	–	?	?
Calcite	S	S	S	S	–	+	–	–	–	–	–	–	–	+	–
Chloritgruppe	S	?	?	?	+++	++	–	–	–	–	–	–	+	–	–
Kaolinit	++	+	S	S	?	?	++	++	+++	++++	++	++	++	+	+
Montmorillonit	++	+++	+++	+++	?	?	+	++	–	–	–	–	–	+	++
Muscovit/Illit	+	++	++	++	+++	++	+	S	+	+	++	+ ²⁾	+++	++	++
Goethit	?	–	–	–	–	–	+	–	–	–	–	–	+	–	++
Ankerit	+	S	S	–	–	+ ¹⁾	–	–	–	–	–	–	–	++	–
Siderit	S	–	–	–	–	–	–	–	+	?	S	–	+	?	+
Gips	S	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Albit	–	–	–	–	S	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Lepidocrocit	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–	–
Pyrit	S	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	S	–
Temp. in °C	650	600	900	750	850	1000	1200	1200	600	1000	1200	1200	950	600	950
Dauer in min	30	30	30	30	30	30	30	5	30	30	5	5	5	30	5
reaktives SiO ₂	41,9	28,3	52,6	47,3	51,0	35,2	29,4	35,0	38,5	35,4	41,3	32,5	35,2	33,8	34,6

S = Spuren
? = nicht sicher nachweisbar
¹⁾ eisenreicher Ankerit, Übergang zu Siderit
²⁾ schlecht kristallisiert

Veränderung des Phasenbestandes einer kaolinitischen Tonprobe. Als optimale Brennbedingungen konnten für diesen Ton eine Brenntemperatur von 1000 °C und eine Brenndauer von 30 min festgelegt werden. Unter diesen Brennbedingungen hatten sich die in der Probe enthaltenen Tonminerale Kaolin und Illit/Muscovit zersetzt und reaktivitätsmindernde Hochtemperaturphasen wie Mullit und Christobalit waren noch nicht entstanden.

Die Gehalte an reaktiver Kieselsäure der getemperten Tone waren deutlich von der Zusammensetzung des jeweiligen Tons, aber auch von den gewählten Brennbedingungen abhängig. In Tafel III-5 sind für jeden Ton Brennbedingungen aufgeführt, die zu hohen Anteilen an reaktiven Bestandteilen führten. Die entsprechenden Gehalte an reaktiver Kieselsäure sind ebenfalls angegeben. Hinsichtlich der reaktiven Bestandteile war generell auffällig, dass mit steigenden Brenntemperaturen der Gehalt an reaktiven siliciumreichen Komponenten zunahm, während der an reaktiven aluminiumreichen Komponenten sank. Reaktive aluminiumreiche Komponenten wurden demnach eher bei niedrigeren Temperaturen gebildet, reaktive siliciumreiche Komponenten auch noch bei höheren Temperaturen.

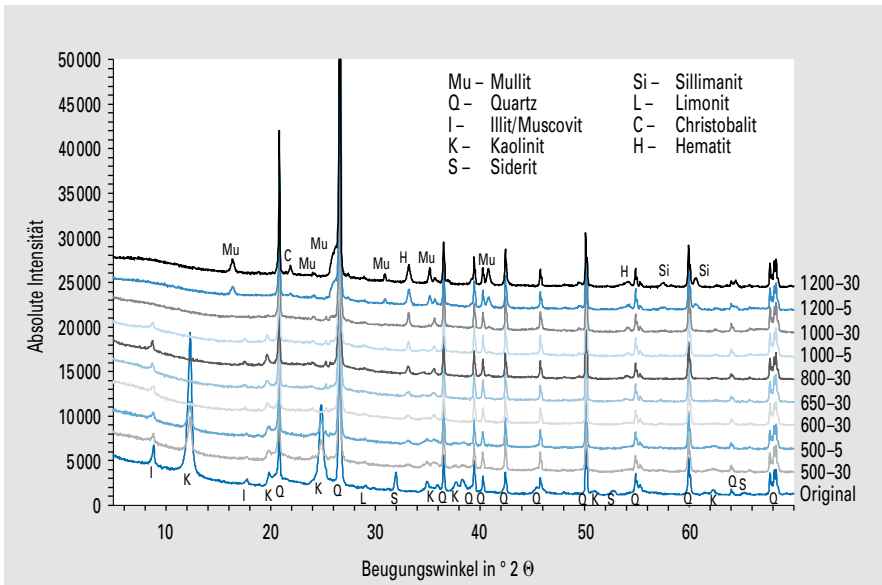


Bild III-13: Röntgendiffraktogramme eines bei unterschiedlichen Brennbedingungen getemperten kaolinitischen Tons (Brennbedingungen rechts im Bild: Temperatur in °C – Brenndauer in Minuten)

Tonhaltige Zemente

Die Herstellung tonhaltiger CEM II- und CEM IV-Zemente erfolgte mit Tafel III-5 entsprechend getemperten Tönen, die rd. 28 bis rd. 51 M.-% reaktive Kieselsäure enthielten. Die Zemente wurden hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit in Anlehnung an DIN EN 196 untersucht. Der Wasseran-

spruch der Zemente stieg erwartungsgemäß mit steigendem Tonanteil. Daher wurden die an 15 mm x 15 mm x 60 mm großen Miniprismen bestimmten Druckfestigkeiten der CEM II-Zemente normgemäß mit einem w/z-Wert von 0,50 ermittelt, die der CEM IV-Zemente hingegen mit einem w/z-Wert von 0,60. Die Ergebnisse sind in

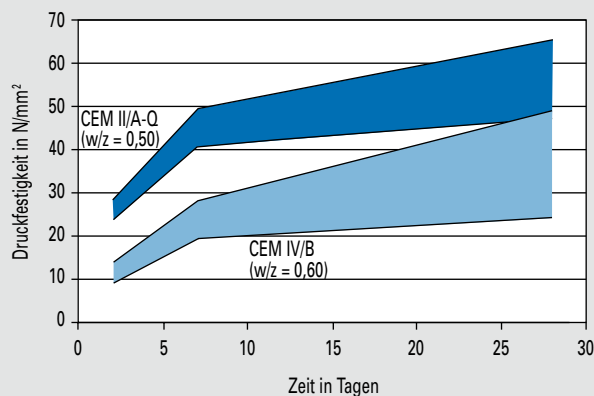


Bild III-14: Festigkeitsentwicklung nach DIN EN 196-1 der CEM II/A-Q- und der CEM IV/B-Zemente mit jeweils 20 M.-% getempertem Ton ($w/z = 0,50$) und 40 M.-% getempertem Ton ($w/z = 0,60$)

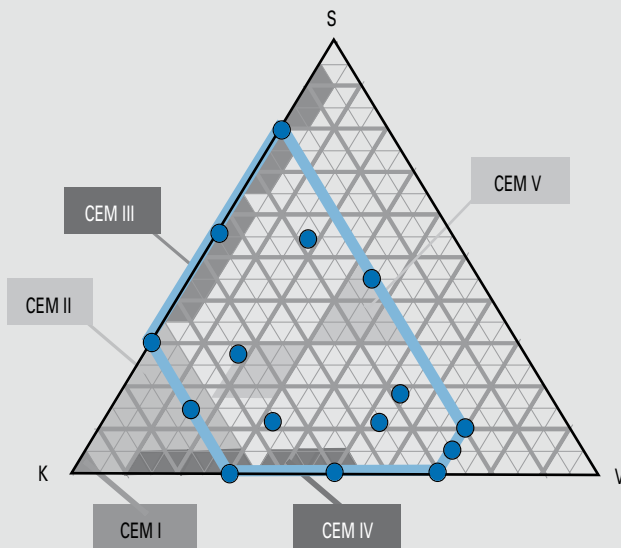


Bild III-15: Mischungsversuchsplan gemäß Ergebnissen der statistischen Versuchsplanung (K = Portlandzement; S = Hüttensand; V = Steinkohlenflugasche)

Bild III-14 dargestellt. Die Druckfestigkeiten der CEM II-Zemente im Alter von 2 Tagen lagen zwischen rd. 24 und rd. 29 N/mm², die Normfestigkeiten zwischen rd. 48 und rd. 66 N/mm². Demnach ließe sich der Großteil dieser Zemente in die Festigkeitsklasse 52,5 N einordnen. Die mit einem w/z -Wert von 0,60 ermittelten Druckfestigkeiten der CEM IV-Zemente lagen im Alter von 2 Tagen zwischen rd. 9 und rd. 13 N/mm², im Alter von 28 Tagen zwischen rd. 24 und rd. 49 N/mm².

Hinsichtlich der Festigkeitsentwicklung der tonhaltigen Zemente führten höhere Gehalte an reaktivem Silicium nicht automatisch zu höheren Druckfestigkeiten. Hingegen konnte ein deutlicher Einfluss der ursprünglich in den Tonen vorhandenen Tonminerale auf die Festigkeitsentwicklung der Zemente festgestellt werden. Demnach stieg der Festigkeitsbeitrag der getemperten Produkte in der Reihe Muscovit/Illit < Montmorillonit < Kaolinit.

Ternäre Zemente mit Flugasche und Hüttensand als Hauptbestandteil ■

Die Herstellung und Verwendung von Zementen mit einem Klinkeranteil unter 65 M.-% gewinnt, aufgrund der Bestrebungen der Zementindustrie den CO_2 -Ausstoß pro Tonne Zement zu verringern, zunehmend an Bedeutung. Bisher liegen in Deutschland abgesehen von Hochofenzementen aber nur wenige Praxiserfahrungen mit Zementen mit geringen Klinkeranteilen vor. Das Forschungsinstitut der Zementindustrie führte im Berichtszeitraum gemeinsam mit dem FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V. ein AiF-Forschungsprojekt (IGF-Nr. 16148 N) durch, in dem ein großer Bereich möglicher Zementzusammensetzungen im Dreistoffsystem Klinker, Hüttensand und Steinkohlenflugasche hinsichtlich ihrer Zementeigenschaften und der Dauerhaftigkeit damit hergestellter Be-

tone untersucht wurde. Der Bereich der hierfür untersuchten Kombinationen reichte von den CEM II-Zementen über die CEM IV- und CEM V-Zemente hin zu bisher nicht genormten Zementen. Die Erstellung des Versuchsplans sowie die Auswertung der Ergebnisse erfolgten mithilfe statistischer Methoden.

Ausgangsstoffe

Für die Herstellung der hüttensand- und flugaschehaltigen Zemente wurden zwei verschiedene Portlandzemente (Z) der Festigkeitsklasse 42,5 R eingesetzt, die die Anforderungen an Prüfzemente nach DIN EN 450-1 erfüllten. Weiterhin wurden zwei Hüttensande (S) mit unterschiedlichen Aktivitätsindizes (AI) verwendet. Die Hüttensande kamen in zwei verschiedenen Feinheiten ($4\,200\text{ cm}^2/\text{g}$ und $5\,500\text{ cm}^2/\text{g}$ nach Blaine) zum Einsatz. Es wurden darüber hinaus zwei Steinkohlenflugaschen (V) aus deutschen Kohlekraftwerken genutzt, die sich hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung deutlich voneinander unterschieden. Die chemische Zusammensetzung sowie die granulometrischen Parameter der Ausgangsstoffe sind in **Tafel III-6** angegeben.

Parameterstudie

Mithilfe der statistischen Versuchsplanung wurde eine Versuchsmatrix mit 108 Zementen bei 15 verschiedenen Zusammensetzungen (vgl. **Bild III-15**) erstellt, an denen neben der 28-Tage-Druckfestigkeit auch die nach 2 und 7 Tagen freigesetzte Hydratationswärmemenge ermittelt wurde. Die Ergebnisse wurden statistisch ausgewertet, sodass für jeden Parameter ein Modell mit möglichst hoher Regression entstand, das nur noch signifikante Einflussparameter enthielt. Die Ergebnisse der Bestimmung der 28-Tage-Druckfestigkeit sind in **Bild III-16** dargestellt. Zur besseren Einordnung der Zementzusammensetzung sind die nach DIN EN 197-1 genormten Zementzusammensetzungen grau hervorgehoben. Aus dem Bild geht hervor, dass es über weite Bereiche der untersuchten Zementzusammensetzungen möglich war, Zemente mit einer 28-Tage-Druckfestigkeit von über $42,5\text{ N/mm}^2$ herzustellen. Dabei hatte die Qualität des Hüttensands einen deutlichen Einfluss. So ermöglichte der Einsatz eines besonders reaktiven Hüttensands (linkes Diagramm in Bild III-16) die Verwendung von bis zu 40 M.-% Steinkohlenflugasche im Zement.

Je geringer der Portlandzementklinkergehalt in den Zementen war, umso größer war die Bedeutung der Reaktivität der weiteren Hauptbestandteile. Bei ungünstigen Kom-

Tafel III-6: Chemische Zusammensetzung sowie Angaben zu den granulometrischen Eigenschaften der verwendeten Ausgangsstoffe

Komponente	Einheit	Z 1	Z 2	HS 1 ¹⁾	HS 2 ¹⁾	FA 1	FA 3
UR in HCl/Na ₂ CO ₃	M.-%	0,63	0,41	0,06	0,22	n.b.	n.b.
Glühverlust bei 950 °C		2,90	2,30	1,10	0,40	2,39	4,57
TOC		n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	1,57	4,68
CO ₂		2,25	1,42	0,32	< 0,20	0,06	0,05
Wasser		0,65	0,84	0,86	< 0,20	0,31	< 0,10
Silizium(IV)-oxid	M.-%	20,48	20,06	32,5	39,1	48,19	54,58
Aluminiumoxid		3,99	4,38	14,0	11,8	23,22	26,15
Titandioxid		0,21	0,20	0,81	0,47	0,94	1,31
Phosphor(V)-oxid		0,13	0,08	0,04	0,02	0,03	0,80
Eisen(III)-oxid		2,56	2,47	0,66	0,52	12,14	4,95
Mangan(III)-oxid		0,06	0,04	0,32	1,80	0,13	0,07
Magnesiumoxid		0,81	1,37	9,93	9,03	2,02	1,00
Calciumoxid		64,28	64,73	39,8	35,8	5,14	2,48
Sulfat als SO ₃		2,89	3,45	0,055	0,084	0,90	0,21
Kaliumoxid		0,59	1,17	0,57	1,11	2,30	1,12
Natriumoxid		0,20	0,20	0,50	0,36	0,96	0,22
Natriumaequivalent		0,59	0,97	0,87	1,08	2,47	0,95
Glasgehalt		n.b.	n.b.	100,0	98,6	73,5	64,2
Reaktive Kieselsäure		n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	36,4	41,3
Reindichte	g/cm ³	3,142	3,116	2,917	2,923	2,675	2,543
spez. Oberfläche nach Blaine	cm ² /g	3 543	4 620	4 230	4 260	3 010	4 970
Lageparameter x' (RRSB-Vert.)	µm	20,86	12,41	15,17	15,69	33,13	23,32
Steigungsmaß n (RRSB-Vert.)	—	0,85	0,87	0,79	0,73	1,00	0,84

n.b. = nicht bestimmt
¹⁾ Aktivitätsindex nach 28 d: HS 1 = 104; HS 2 = 88

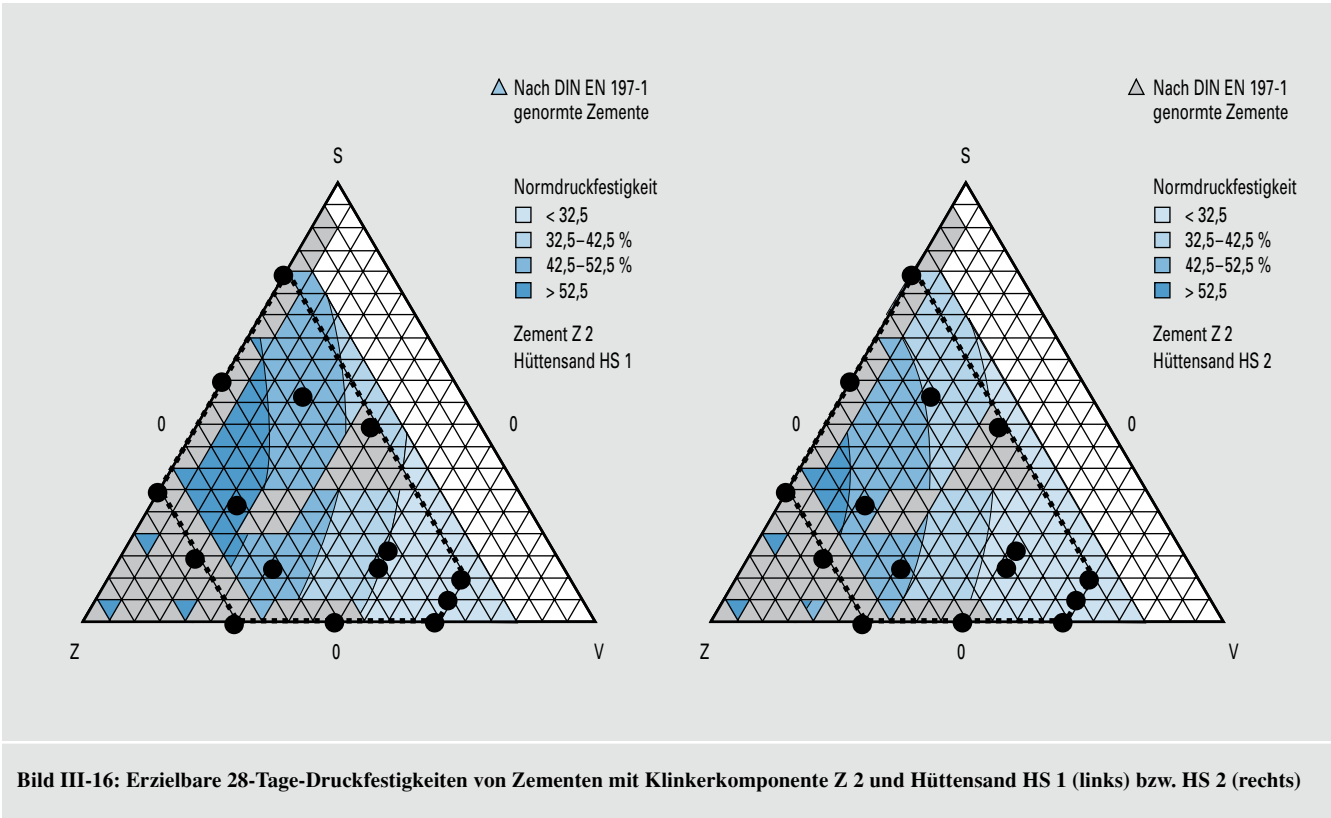


Bild III-16: Erzielbare 28-Tage-Druckfestigkeiten von Zementen mit Klinkerkomponente Z 2 und Hüttensand HS 1 (links) bzw. HS 2 (rechts)

Tafel III-7: Zusammensetzung der für Untersuchungen zum Sulfatwiderstand und für beton-technische Untersuchungen ausgewählten Zemente, Angaben in M.-%

Zement	Z 1	Z 2	HS 1	HS 2	FA 1	FA 3
SVA-1	25	–	5	–	–	70
SVA-2	31	–	–	17	52	–
SVA-3	–	20	–	45	–	35
SVA-4	30	–	–	–	–	70
SVA-5	–	36	–	12	52	–
SVA-6	31	–	52	–	17	–
SVA-7	56	–	27	–	17	–
SVA-8	70	–	–	–	30	–
Beton-1	–	20	80	–	–	–
Beton-2	–	60	–	–	40	–
Beton-3	–	30	35	–	35	–
Beton-4	–	30	35	–	35	–
Beton-5	–	56	12	–	32	–
Beton-6	–	56	36	–	12	–
Beton-7	–	31	52	–	17	–
Beton-8	–	40	45	–	15	–

binationen (geringere Klinker- und Hüttensandreaktivität) war es daher bei den in der Forschungsarbeit durchgeführten Untersuchungen nicht in jedem Fall möglich, eine 28-Tage-Druckfestigkeit von mindestens 42,5 N/mm² zu erreichen.

Generell ist zu berücksichtigen, dass die untersuchten Zemente durch Mischen von Portlandzement, Hüttensandmehl und Steinkohlenflugasche hergestellt wurden. Eine auf die einzelnen Ausgangsstoffe abgestimmte Festigkeitsoptimierung durch eine Anpassung der Mahlfineinheiten oder durch eine Sulfatträgeroptimierung fand nicht statt. Es ist daher davon auszugehen, dass unter praxisnahen Bedingungen auch Zemente mit weniger als 40 M.-% Portlandzementklinker und mit einer Mörteldruckfestigkeit von mehr als 42,5 N/mm² im Alter von 28 Tagen hergestellt werden können.

Aus weiteren Untersuchungen ließ sich ableiten, dass sich auch hinsichtlich der Frühfestigkeitsentwicklung und der weiteren Anforderungen der DIN EN 197-1 marktfähige Zemente in den untersuchten Zusammensetzungsbereichen herstellen lassen.

Acht Zemente aus dem Versuchsprogramm wurden hinsichtlich ihres Sulfatwiderstands nach SVA-Verfahren untersucht. Die Zusammensetzung dieser Zemente ist in **Tafel III-7** aufgeführt. Die Dehnungen der Mörtelprismen lagen unterhalb des Grenzwerts von 0,500 mm/m. Somit wiesen die-

se Zemente einen hohen Sulfatwiderstand auf.

Betontechnische Untersuchungen

Basierend auf den Ergebnissen der zementtechnischen Untersuchungen wurden acht Zemente ausgewählt, mit denen jeweils zwei verschiedene Betone hergestellt und orientierende Betonversuche durchgeführt wurden. Die Zusammensetzungen der Zemente für die betontechnischen Untersuchungen sind in **Tafel III-7** aufgeführt. Betonsorte 1 entsprach den Vorgaben des Deutschen Instituts für Bautechnik für Zulassungsversuche von Bindemitteln, die für die Anwendung in Beton der Expositions-klasse XF3 zugelassen werden sollen ($z = 300 \text{ kg/m}^3$; $w/z = 0,60$). Betonsorte 2 war entsprechend den Mindestanforderungen der DIN 1045-2 an die Betonzusammensetzung für Betone der Expositions-klasse XF4 zusammengesetzt ($z = 320 \text{ kg/m}^3$; $w/z = 0,50$; $LP = 4,5 \text{ Vol.-%}$). Die Frischbetoneigenschaften der untersuchten Betone lagen im für die beiden hergestellten Betonsorten üblichen Bereich. Mit Ausnahme der beiden untersuchten CEM V/B-Zemente (20 M.-% Z; 45 M.-% S; 35 M.-% V) führten alle Zemente in Betonen der Sorte 1 zu 28-Tage-Druckfestigkeiten, mit denen sich zielsicher die Betonfestigkeits-klasse C25/30 realisieren lässt.

Hinsichtlich des Frostwiderstands lagen die nach dem Würfelverfahren bestimmten Abwitterungen der Betone in einer vergleichbaren Größenordnung wie die von Betonen

mit nach DIN 1045-2 für die Expositions-klasse XF3 zugelassenen Zementen. Alle nach dem CDF-Verfahren geprüften Betone wiesen eine mit Werten von über 1,5 kg/m² hohe Abwitterung auf. Diese war durch eine starke Anfangsabwitterung während der ersten Frost-Tau-Wechsel geprägt, die u. a. auf die für langsamer erhärtende Zemente ungünstigen Vorlagerungsbedingungen der Prüfkörper (20 °C / 65 % rel. F.) sowie deren Lagerungsdauer zurückgeführt werden kann.

Ökologische Betrachtungen

Basierend auf den für die statistische Versuchsplanung gewählten Randbedingungen ließen sich die CO₂-Emissionen für die möglichen Kombinationen aus Hüttensand, Portlandzementklinker und Steinkohlenflugasche überschlägig berechnen. Dabei wurden als Eingangsgrößen für den Hüttensand 0,1 t CO₂/t Hüttensand, für den Portlandzement 0,89 t CO₂/t Zement und für die Steinkohlenflugasche 0,05 t CO₂/t SFA gewählt. In **Bild III-17** ist das berechnete CO₂-Einsparpotenzial am Beispiel der ternären Zemente mit Z 1 als Klinkerkomponente und HS 2 als Hüttensandkomponente sowie beiden untersuchten Steinkohlenflugaschen dargestellt. Für Zemente bestehend aus den oben genannten Komponenten links der weißen gestrichelten Linie konnte eine Normdruckfestigkeit von über 42,5 N/mm² modelliert werden, für Zemente links der blauen gestrichelten Linie eine Normdruckfestigkeit von über 52,5 N/mm². Die Zusammensetzung bereits genormter Zemente ist grau dargestellt und dient zur Orientierung. Die Berechnung ergab, dass sich Zemente mit Normdruckfestigkeiten von über 42,5 N/mm² bzw. von über 52,5 N/mm² im Vergleich zu Portlandzement mit bis zu rd. 77 % bzw. rd. 55 % geringeren CO₂-Emissionen herstellen lassen. Besonders der nicht genormte Bereich zwischen den CEM III- und CEM V-Zementen war sehr vielversprechend sowohl hinsichtlich der erreichbaren Druckfestigkeiten als auch hinsichtlich der möglichen CO₂-Einsparung. Der Bereich zwischen den CEM IV- und CEM V/A-Zementen ist ebenfalls nicht durch die Vorgaben der Norm abgedeckt. Die Herstellung von Zementen der Festigkeitsklasse 42,5 ist aber auch innerhalb dieses Zusammensetzungsbereichs möglich.

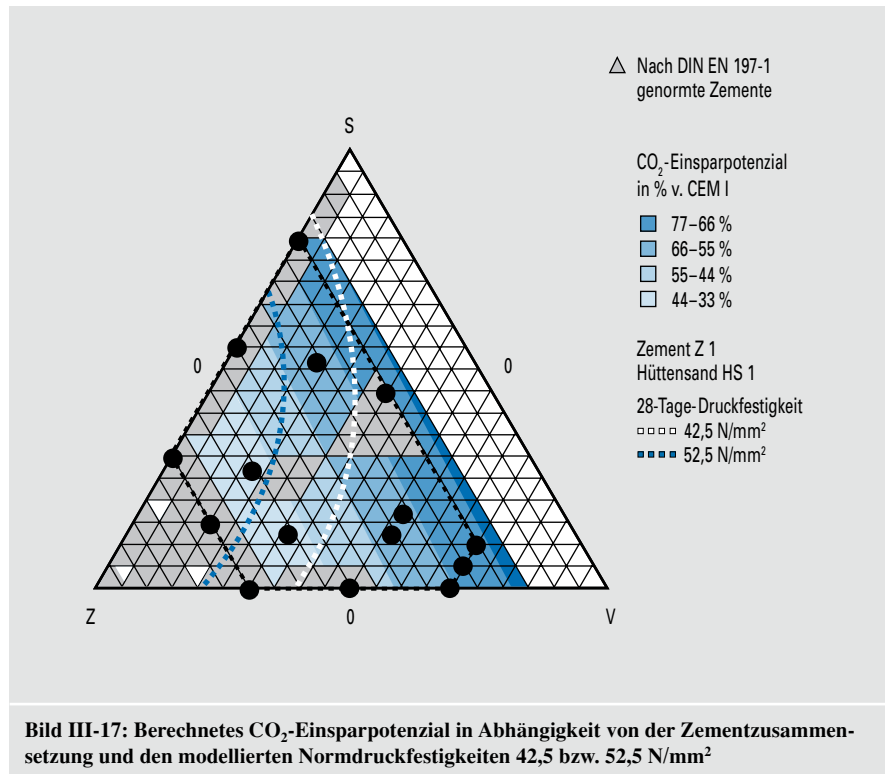
Sulfatwiderstand bei Magnesiumexposition ■

Bei Labor- und Auslagerungsversuchen wurden unerwartet an einigen eigentlich sulfatbeständigen Beton- und Mörtelprüfkörpern Schäden festgestellt, wenn diese

neben Sulfat auch Magnesium im angreifenden Wasser ausgesetzt waren. Die Schäden traten auf, obwohl die Magnesiumgehalte deutlich unterhalb des Grenzwerts von 300 mg/l für die Angriffsklasse XA1 lagen. Betroffen waren Prüfkörper auf Basis von Portland- und Portlandkalksteinzement jeweils in Kombination mit Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff.

In einem Forschungsprojekt (IGF-Nr. 16710 N) wurden die stofflichen Voraussetzungen und Randbedingungen untersucht, unter denen ein Sulfatangriff durch Lösungen mit 1500 mg Sulfat/l und Magnesiumgehalten von bis zu 300 mg/l zu Schädigungen an Mörteln und Betonen führen kann, wenn diese gemäß Flugascheregelung nach DIN 1045-2 mit Zement und Steinkohlenflugasche hergestellt werden.

Geprüft wurden fünf Zemente (CEM I, CEM II/A-LL, CEM II/B-S, CEM II/B-M (S-LL), CEM III/A) in Kombination mit zwei Steinkohlenflugaschen sowie als Referenz ein CEM III/B-HS und ein CEM I-HS. Der Großteil der Versuche wurde jedoch mit Portland- und Portlandkalksteinzement durchgeführt. Erste Schäden in Form von gefügeentfestigender Thaumasilbildung traten nach ungefähr 6 Monaten bei Prüfkörpern auf Basis des Portlandkalksteinzements auf, die bei niedriger Temperatur (8 °C) gelagert wurden und bei denen die Magnesiumkonzentration 300 mg/l betrug. Ein vergleichbares Verhalten zeigten die Prüfkörper auf Basis des Portlandzements, allerdings erst nach rund 12 Monaten. Maßgeblich für das Auftreten von Schäden war eine unzureichende Gefügedichtigkeit zu Beginn des Sulfatangriffs. Bei der üblichen kurzen Vorlagerungszeit von 14 Tagen während der SVA-Prüfung konnte Sulfat trotz einer sich schnell bildenden dünnen oberflächennahen Brucitschicht in das Gefüge eindringen und dort sekundären Ettringit sowie Thaumasil bilden. Bei längerer Vorlagerungszeit der Prüfkörper (90 Tage) oder einer Lagerung bei 20 °C blieben alle geprüften Zemente ungeschädigt. Die beiden Referenzzemente CEM I-HS und CEM III/B-HS zeigten unter allen Prüfbedingungen keine Schwächen, sodass weiter davon auszugehen ist, dass die Gegenwart von Magnesium (≤ 300 mg/l) für HS-Zemente kein zusätzliches Angriffspotenzial darstellt. Ein weiterer, ausführlicherer Bericht zu diesem Forschungsprojekt findet sich in Kapitel V im Abschnitt Sulfatwiderstand.



Nanooptimierte Bindemittel mit hohem Säurewiderstand ■

Aus den Erfahrungen mit ultrahochfesten Betonen ist bekannt, dass durch eine Kornoptimierung mit Feinstpartikeln die Gefügedichtigkeit, Festigkeit und Dauerhaftigkeit von Betonen deutlich verbessert werden kann. Darauf aufbauend wurde Mitte 2009 ein durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördertes Verbundforschungsprojekt mit dem Titel „Kalt härtende Keramik durch nanotechnologische Gefügeoptimierung“ gestartet. Neben dem Forschungsinstitut der Zementindustrie sind neun weitere Projektpartner beteiligt. Sie vertreten die gesamte Wertschöpfungskette, von den Herstellern der einzelnen Rohstoffe, über die Formulierer und Hersteller von Bauprodukten, bis hin zu den Anwendern.

Ziel: hoher Säurewiderstand

Die neuen Bindemittelformulierungen sollen ohne aufwendige Autoklavbehandlung bei Temperaturen unter 100 °C erhärten und die Herstellung chemisch und mechanisch hoch widerstandsfähiger Betonbauteile und Beschichtungsmörtel ermöglichen. Im Fokus stehen Anwendungsfälle, bei denen Beton nach DIN EN 206-1/ DIN 1045-2 bislang gar nicht oder nur mit zusätzlichen teuren Schutzmaßnahmen verwendet werden kann (z. B. Expositionsklassen XA3 und XM3).

Das Forschungsinstitut der Zementindustrie befasste sich im Wesentlichen mit der Gefügeoptimierung eines ultrahochfesten Betons, dessen Zusammensetzung (M3Q) in **Tafel III-8** angegeben ist. Zum einen sollte die Gefügedichte durch Minimierung der Packungsdichte und der Porosität optimiert werden. Zum anderen sollte durch einen teilweisen Austausch des Portlandzements durch Kombinationen aus Hüttensand und Flugasche bzw. Feinsthüttensand und Feinstflugasche die Säurebeständigkeit erhöht werden. Die erforderlichen Modellrechnungen zur Packungsdichte und Gefügeoptimierung wurden beim Projektpartner, der Universität Kassel, durchgeführt. Das Fraunhofer Institut für Silicatiforschung hatte die Aufgabe, für eine weitergehende Gefügeverdichtung Silica mit definierten Teilchengrößen von rund 100 bis 800 nm zu entwickeln, die als redispersierbare Mikropartikel eingesetzt werden können.

Optimierte Betonzusammensetzungen

Ein eigens angeschaffter Hochleistungsmischer ermöglichte die Herstellung homogener, reproduzierbarer Bindemittelgemische und Betone. Insgesamt wurden im Forschungsinstitut rund 30 verschiedene Zusammensetzungen mit Portlandzementanteilen zwischen 10 und 34 Vol.-% hergestellt und auf ihre Festigkeit und Porosität untersucht. Hierbei wurde der Portlandzementanteil überwiegend durch Hüttensand und Feinsthüttensand substituiert,

Tafel III-8: Ausgewählte Betonzusammensetzungen sowie Druckfestigkeiten, Porositäten und Säurewiderstand

Komponente/Parameter	Einheit	Referenz M3Q	Optimierung A	Optimierung B	Optimierung C	Optimierung D	Optimierung E
CEM I	Vol.-%	34	14	14	14	14	10
Hüttensand 1/2	Vol.-%	–	3/10	2,3/7,5	2,4/8	8/–	8/–
Feinsthüttensand	Vol.-%	–	7	5,3	5,6	3	5
Flugasche 2	Vol.-%	–	–	–	–	–	5
Silica	Vol.-%	10	10	12	12	14	13
Quarzmehl	Vol.-%	10	10	9	8	9	1
Quarzsand	Vol.-%	46	46	50	50	52	58
Packungsdichte, calc.	Vol.-%	81,4	82,4	84,0	85,1	85,7	86,1
7-Tage-Druckfestigkeit	N/mm ²	136	127	121	122	122	98
28-Tage-Druckfestigkeit	N/mm ²	167	159	145	146	141	127
Gelporosität, ≤ 0,01 µm	Vol.-%	3,3	3,3	3,4	3,3	4,0	5,0
Kapillarporosität, > 0,01–100 µm	Vol.-%	1,7	0,8	0,9	1,3	1,4	1,6
Säurewiderstand	–	0	++	++	+	+	++

Wasserbindemittelwert = 0,193; Fließmittel (PCE): 1,2 M.-% v. Bindemittel
(Bindemittel: Masse an CEM I, Hüttensand, Feinsthüttensand, Flugasche und Silica)

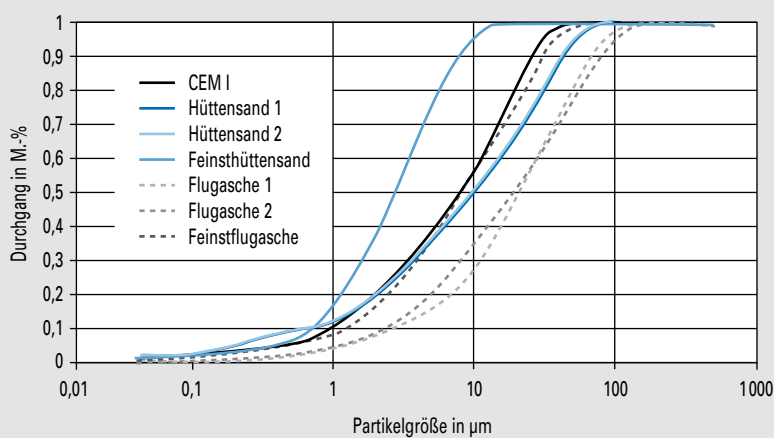


Bild III-18: Korngrößenverteilung der in den Betonzusammensetzungen eingesetzten Hüttensande, Flugaschen und des Portlandzements

um einen möglichst hohen Säurewiderstand bei pH1 zu erreichen.

Die Tafel III-8 zeigt eine Auswahl von Betonzusammensetzungen, die entsprechend erzielten Druckfestigkeiten, Porositäten und eine Einschätzung des jeweiligen Säurewiderstands. Die Auswahl umfasst Zusammensetzungen, mit denen relativ hohe Packungsdichten, Druckfestigkeiten und Säurewiderstände erreicht wurden.

Beispielsweise wurde mit Beton gemäß Optimierung A bei Substitution von rd. 60 % des Zementvolumens durch Hütten-

bzw. Feinsthüttensand im Vergleich zur Referenzmischung M3Q die Kapillarporosität auf 0,8 Vol.-% halbiert und der Säurewiderstand erheblich gesteigert. Wie aus Tafel III-8 hervorgeht, korrelierten die berechneten Packungsdichten jedoch nicht mit den erzielten Porositäten und Druckfestigkeiten. Die höchste Packungsdichte der in Tafel III-8 vorgestellten Zusammensetzungen wurde für Optimierung E berechnet. Jedoch lagen die im Alter von 7 bzw. 28 Tagen erzielten Druckfestigkeiten deutlich unter und die Porositäten deutlich über denen der Referenzzusammensetzung. Das war vermutlich auf den mit 10 Vol.-%

niedrigsten Portlandzementanteil aller untersuchten Zusammensetzungen zurückzuführen. Für die angestrebte möglichst hohe Druckfestigkeit war der Einsatz von Hüttensand günstiger als der Einsatz von Flugasche. Als eine Ursache sind die unterschiedlichen Korngrößenverteilungen der Ausgangsstoffe anzusehen, die in **Bild III-18** dargestellt sind. So waren die beiden Flugaschen deutlich und die gesichtete Feinstflugasche leicht gröber als die Portlandzementkomponente. Die Hüttensande unterschieden sich untereinander kaum und nur wenig vom Portlandzement. Sie eigneten sich daher gut für die Substitution. Der Feinsthüttensand war die mit Abstand feinste Komponente und daher besonders für die Packungsdichteoptimierung geeignet.

Ausgewählte Proben wurden beim Projektpartner Universität Kassel u. a. nach der Sielbau-Richtlinie 2001 auf ihre Säurebeständigkeit untersucht. Aufgrund positiver Ergebnisse wurden wiederum einzelne Zusammensetzungen bei Projektpartnern zur Herstellung von Betonrohren mit einem Innendurchmesser von 20 cm und einer Länge von rd. 1 m eingesetzt. Prüfkörper aus diesen Betonrohren werden derzeit ebenfalls auf ihre Säurebeständigkeit geprüft. Darüber hinaus laufen im Forschungsinstitut noch bis Herbst 2012 weitere Untersuchungen zu den Frischbeton- und Dauerhaftigkeitseigenschaften (u. a. Sulfatwiderstand, Frostbeständigkeit).

Einfluss von Additiven auf Druckfestigkeit und Carbonatisierungsneigung von Hochofenzement ■

In einem BMBF-Forschungsprojekt wurde der Einfluss von Additiven auf die Festigkeitsentwicklung und das Carbonatisierungsverhalten von Zementsteinen, Mörteln und Betonen mit Hochofenzementen (CEM III/A) untersucht. Insbesondere wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Additive wie Metakaolin, Calciumhydroxid und Silicastaub untersucht. (Siehe auch Kapitel V, Abschnitt „Carbonatisierung von Hochofenzementbetonen“.)

Auswirkung verschiedener Additive

Die Grundlagenuntersuchungen wurden mit zwei Hüttensanden (HS 1 und HS 2) durchgeführt. Entsprechend der chemischen Zusammensetzung in **Tafel III-9** ist davon auszugehen, dass Hüttensand HS 1 mit höherem Al_2O_3 -Gehalt und geringerem SiO_2 -Gehalt einen höheren Festigkeitsbeitrag als Hüttensand HS 2 im Zement liefert. Die Hüttensande wurden auf eine Feinheit von ca. 3 800 cm^2/g nach Blaine gemahlen. Als Zementklinker wurden ein Weißzementklinker (KA) und ein Portlandzementklinker (KB), beide mit einer Feinheit von ca. 4 000 cm^2/g , ausgewählt (s. **Tafel III-9**). Der eisenarme Weißzementklinker wurde ausgewählt, um amorphe Silicathydrogele und gegebenenfalls entstandene amorphe Aluminosilicate mittels NMR-Spektroskopie besser untersuchen zu können. Das aluminiumhaltige Additiv Metakaolin (A) wurde durch zweistündiges Tempern von Kaolin bei 700 °C hergestellt. Ebenfalls wurden Silicastaub (S) und Calciumhydroxid (C) als weitere Additive eingesetzt.

Die untersuchten Hochofenzemente (HOZ 1 bis HOZ 4) enthielten stets 35 M.-% Portlandzementklinker (KA bzw. KB) und 65 M.-% Hüttensand (HS 1 bzw. HS 2). Als Erstarrungsregler wurde ein Gemisch aus Gips und Anhydrit im Verhältnis 1:1 verwendet. Der Gehalt an Erstarrungsregler wurde bei allen Zementen auf 3,5 M.-% SO_3 , bezogen auf den Anteil an Hauptbestandteilen, eingestellt. Die Hochofenzemente enthielten jeweils 5 M.-% eines Additivs (Metakaolin (A), Silicastaub (S) und Calciumhydroxid (C)). Referenzzemente bestanden aus dem jeweiligen Klinker bzw. Hüttensand und enthielten anstelle des Additivs 5 M.-% Kalkstein (N).

Die Druckfestigkeit der labortechnisch hergestellten Hochofenzemente wurde an

Tafel III-9: Chemische Zusammensetzung der eingesetzten Ausgangsstoffe: HS = Hüttensand; KA = Weißzementklinker; KB = Portlandzementklinker; N = Kalkstein; A = Metakaolin; Angaben in M.-%

Komponente	HS 1	HS 2	KA	KB	N	A
SiO_2	31,98	38,36	23,25	21,46	2,59	51,54
Al_2O_3	16,61	9,13	4,99	5,33	0,55	43,94
TiO_2	0,95	0,97	0,15	0,28	0,03	1,41
P_2O_5	0,01	0,01	0,04	0,24	0,10	0,11
Fe_2O_3	0,24	1,76	0,15	3,04	0,20	0,85
Mn_2O_3	0,41	1,10	0,02	0,11	0,06	0,01
CaO	36,29	36,56	67,34	67,47	53,01	0,02
MgO	10,58	8,29	0,57	1,25	0,45	0,07
SO_3	0,04	0,01	0,47	0,21	0,02	0,09
S^{2-}	1,07	1,05	–	–	–	–
K_2O	0,41	1,25	1,37	0,27	0,12	0,18
Na_2O	0,38	0,41	0,12	0,11	0,01	0,06

Normmörtelprismen gemäß DIN EN 196-1 im Alter von 2, 7, 28 und 91 Tagen ermittelt. Die Carbonatisierungstiefen wurden ebenfalls an bei Normklima (20 °C / 65 % rel. F.) gelagerten Normmörtelprismen im Alter von 28, 42, 56, 84, 119, 208 und 393 Tagen gemäß Heft 422 des DAfStb bestimmt.

In den **Bildern III-19** bis **Bild III-22** sind die Normmörteldruckfestigkeiten bzw. die Carbonatisierungstiefen der untersuchten Hochofenzemente dargestellt. Die Hochofenzemente ohne Kalkstein (N) zeigten zum jeweiligen Prüftermin nahezu die gleichen Druckfestigkeiten wie mit 5 M.-% Kalkstein (N) und sind deshalb nicht dargestellt.

Druckfestigkeit

Wie aus den Bildern III-19 und III-20 ersichtlich ist, wiesen die Hochofenzemente mit Hüttensand HS 2 mit dem niedrigeren Aluminat- und dem höheren Siliziumgehalt (HOZ 2 und 4) unabhängig vom Klinker (KA oder KB) grundsätzlich geringere Druckfestigkeiten auf als die Hochofenzemente mit Hüttensand HS 1 mit dem höheren Aluminat- und dem niedrigeren Siliziumgehalt (HOZ 1 und 3).

Wie aus **Bild III-19** hervorgeht, führte die Zugabe des aluminiumhaltigen Additivs Metakaolin (A) insbesondere beim leistungsschwachen Hochofenzement HOZ 2 zu einer Steigerung der 2-Tage-Druckfes-

tigkeit von rd. 50 % und beim leistungsschwachen Hochofenzement HOZ 1 von rd. 20 %. Auch die Druckfestigkeit im Alter von 7 Tagen wurde erhöht.

Die Zugabe von 5 M.-% Calciumhydroxid (C) hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Druckfestigkeit der Hochofenzemente HOZ 1 und HOZ 2.

Die Zugabe von 5 M.-% Silicastaub (S) bewirkte eine Erhöhung der 2-Tage-Druckfestigkeit von rd. 20 % sowie eine geringfügig höhere Druckfestigkeit im Alter von 28 (HOZ 2) bzw. 91 Tagen (HOZ 1 und 2).

Wie **Bild III-20** zeigt, bewirkte die Zugabe des aluminiumhaltigen Additivs Metakaolin (A) insbesondere beim leistungsschwachen Hochofenzement HOZ 3 eine Steigerung der Druckfestigkeit im Alter von 7 bis 91 Tagen. Beim leistungsschwachen Hochofenzement HOZ 4 wurde die Druckfestigkeit nur im Alter von 7 Tagen geringfügig erhöht.

Die Zugabe von 5 M.-% Calciumhydroxid (C) hatte unabhängig vom Hüttensand keinen signifikanten Einfluss auf die Druckfestigkeit der Hochofenzemente HOZ 3 und HOZ 4.

Die Zugabe von 5 M.-% Silicastaub (S) bewirkte eine geringfügige Erhöhung der 91-Tage-Druckfestigkeit beim Hochofen-

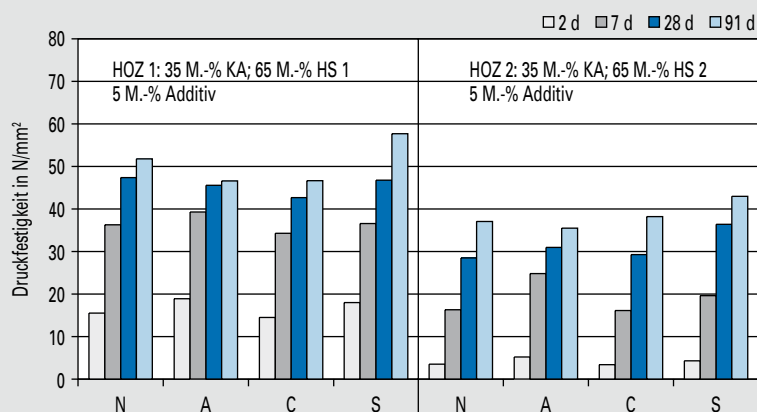


Bild III-19: Normmörteldruckfestigkeiten gemäß DIN EN 196-1 der Hochofenzemente aus Klinker KA mit Hüttensand HS 1 bzw. HS 2 und mit 5 M.-% Additiv (N = Kalkstein, A = Metakaolin, C = Calciumhydroxid, S = Silicastaub)

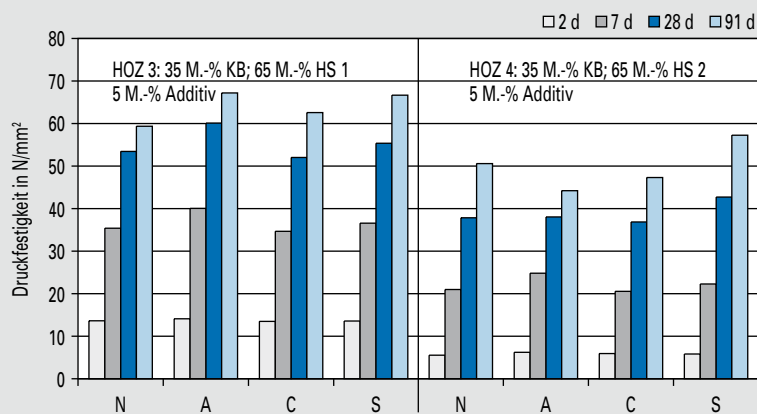


Bild III-20: Normmörteldruckfestigkeiten gemäß DIN EN 196-1 der Hochofenzemente aus Klinker KB mit Hüttensand HS 1 bzw. HS 2 und mit 5 M.-% Additiv (N = Kalkstein, A = Metakaolin, C = Calciumhydroxid, S = Silicastaub)

zement HOZ 3 sowie eine Steigerung der 28- und 91-Tage-Druckfestigkeit beim Hochofenzement HOZ 4.

Carbonatisierung

Neben der generell höheren Druckfestigkeit wurde bei den Hochofenzementen mit Hüttensand HS 1 (HOZ 1 und HOZ 3) auch ein deutlich höherer Carbonatisierungswiderstand im Vergleich zu den Hochofenzementen mit Hüttensand HS 2 (HOZ 2 und 4) festgestellt (s. Bilder III-21 und III-22).

Wie aus Bild III-21 hervorgeht, führte die Zugabe von 5 M.-% Metakaolin (A) zu einer geringfügigen Erhöhung des Carbonatisierungswiderstands bis zum Alter von 56 Tagen beim Hochofenzement HOZ 1 und bis zum Alter von 119 Tagen beim Hochofenzement HOZ 2.

Die Zugabe von 5 M.-% Calciumhydroxid (C) bewirkte einen höheren Carbonatisierungswiderstand bis zum Alter von 208 Tagen beim Hochofenzement HOZ 1 und bis

zum Alter von 393 Tagen beim Hochofenzement HOZ 2.

Die Zugabe von 5 M.-% Silicastaub (S) erhöhte den Carbonatisierungswiderstand beim Hochofenzement HOZ 2 am wirksamsten. Beim Hochofenzement HOZ 1 waren hingegen keine signifikanten Unterschiede im Carbonatisierungswiderstand zu erkennen.

Aus Bild III-22 geht hervor, dass die Additive Metakaolin (A), Calciumhydroxid (C), Silicastaub (S) jeweils tendenziell den Carbonatisierungswiderstand beim Hochofenzement HOZ 3 erhöhten. Die Zugabe von 5 M.-% Metakaolin (A) hatte je nach Lagerungsdauer keinen signifikanten Einfluss auf das Carbonatisierungsverhalten des Hochofenzements HOZ 4. Durch Zugabe von Calciumhydroxid (C) bzw. Silicastaub (S) war hingegen eine Erhöhung des Carbonatisierungswiderstands von mit HOZ 4 hergestellten Proben zu erkennen.

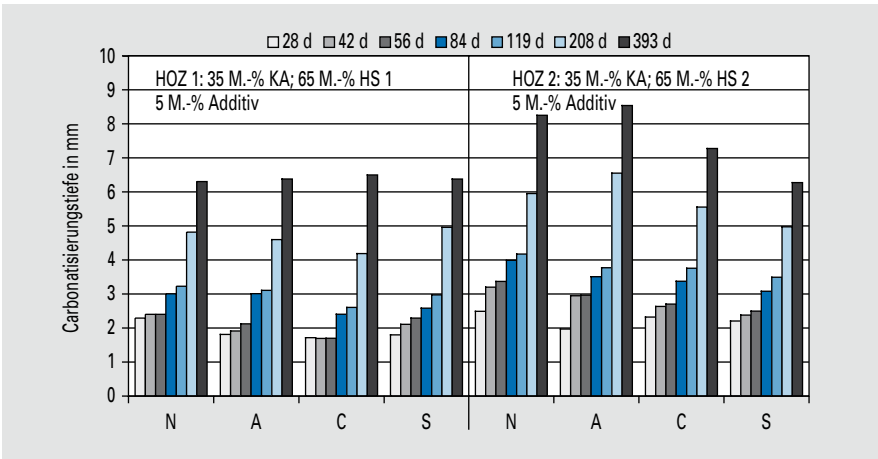


Bild III-21: Carbonatisierungstiefen der Hochofenzemente aus Klinker KA mit Hüttensand HS 1 bzw. HS 2 und mit 5 M.-% Additiv (N = Kalkstein, A = Metakaolin, C = Calciumhydroxid, S = Silicastaub) bei Lagerung unter Normklima

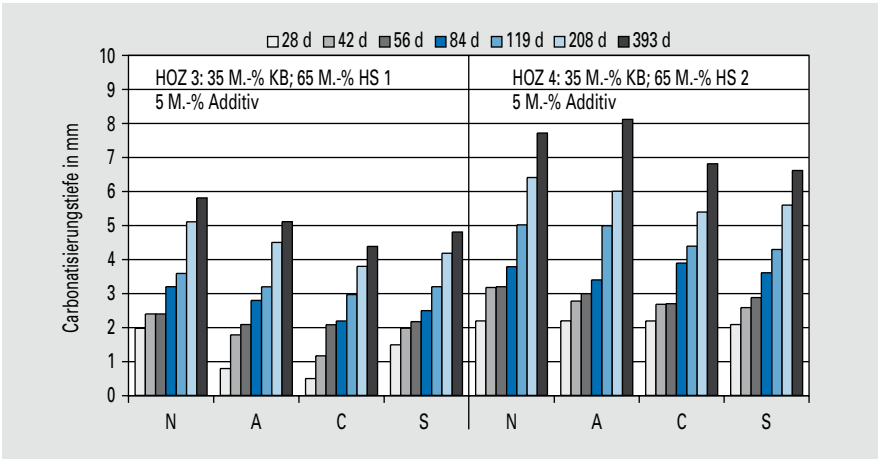


Bild III-22: Carbonatisierungstiefen der Hochofenzemente aus Klinker KB mit Hüttensand HS 1 bzw. HS 2 und mit 5 M.-% Additiv (N = Kalkstein, A = Metakaolin, C = Calciumhydroxid, S = Silicastaub) bei Lagerung unter Normklima

IV

Güteüberwachung und Qualitätssicherung von Zement

75



Prüfung der Druckfestigkeit von Zement

Überwachungsgemeinschaft des VDZ ■

Die Prüfung, Überwachung und Zertifizierung von Zement und zementartigen Bindemitteln gehören zu den traditionellen Kernkompetenzen des VDZ. Damit trägt der Verein seit vielen Jahrzehnten zur Erfüllung der Schutzziele der Bauproduktenrichtlinie und deren nationaler Umsetzung sowie der Landesbauordnungen bei. Die entsprechenden Aufgaben werden durch die Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle (PÜZ-Stelle) in der Abteilung Qualitätssicherung und Analytik des Forschungsinstituts der Zementindustrie ausgeführt. Die Ergebnisse der Fremdüberwachung werden im Fachausschuss der Überwachungsgemeinschaft des VDZ zweimal jährlich beraten.

Bindemittel, deren Konformität mit den Anforderungen einer europäisch harmonisierten Norm nachgewiesen ist, werden mit dem CE-Zeichen gekennzeichnet. Sie dürfen dann in allen Ländern des europäischen Wirtschaftsraums frei gehandelt werden. Mittlerweile tragen nahezu alle Bindemittel in Deutschland das CE-Zeichen. Hierbei handelt es sich insbesondere um alle Zemente nach EN 197-1 einschließlich solcher mit der Zusatzeigenschaft niedrige Hydratationswärme LH sowie alle Putz- und Mauerbinder nach EN 413-1. Zemente mit hohem Sulfatwiderstand und niedrigem wirksamen Alkaligehalt erfüllen ebenfalls die Anforderungen an Normalzemente und werden zurzeit durch nationale Normen, in Deutschland die DIN 1164-10, erfasst. Da Zemente mit hohem Sulfatwiderstand zukünftig in der europäisch harmonisierten Norm EN 197-1 geregelt werden, wird die DIN 1164-10 ab 2013 nur noch Zemente mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt behandeln. Hydraulische Boden- und Tragschichtbinder werden in Deutschland bislang in der DIN 18506 geregelt. Auch für sie ist eine europäische Normenreihe EN 13282 in Arbeit.

Anerkennung und Akkreditierung

Die PÜZ-Stelle im Forschungsinstitut der Zementindustrie ist seit vielen Jahren im gesetzlich geregelten Bereich tätig. Bis zum vollständigen Inkrafttreten der BauPVO ist sie nach dem deutschen Bauproduktengesetz (BauPG), das die EU-Bauproduktenrichtlinie umsetzt, notifiziert und bei der Europäischen Kommission als benannte Stelle Nr. 0840 geführt. Außerdem ist die PÜZ-Stelle national nach den gültigen Landesbauordnungen (LBO) anerkannt.

Tafel IV-1: Anerkennungsbereiche der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle für Bauprodukte

Bauprodukte	Technische Regeln	Konformitäts-Nachweisstufe	
		BPG	LBO
Bindemittel			
Normalzement	EN 197-1	1 +	
Zement mit besonderen Eigenschaften	EN 197-4	1 +	
	EN 14216	1 +	
	DIN 1164-10, -11, -12		ÜZ
Tonerdezement	EN 14647	1 +	
Putz- und Mauerbinder	EN 413-1	1 +	
Hydraulischer Tragschichtbinder	DIN 18506		(ÜZ) ¹⁾
Baukalk	EN 459-1	2	
Sonstige zementartige Bindemittel (inkl. Spritzbetonzemente)	Zulassung ²⁾		ÜZ
Betonzusatzstoffe			
Pigmente	EN 12878	2 +	
Flugasche	EN 450-1	1 +	
Silicastaub	EN 13263-1	1 +	
Hüttensandmehl	EN 15167-1	1 +	
Natürliche Puzzolane (Trass)	DIN 51043		ÜZ
Sonstige Betonzusatzstoffe	Zulassung ²⁾		ÜZ
Betonzusatzmittel			
	EN 934-2, -3, -4	2 +	
	DIN V 18998		ÜHP
	Zulassung ²⁾		ÜZ
Gesteinskörnungen			
	EN 12620	2 +	
	EN 13055-1	2 +	
	EN 13139	2 +	
Mörtel im Mauerwerksbau			
	EN 998-2	2 +	
Einpressmörtel			
	EN 447		ÜZ
Beton nach Eigenschaften, Beton nach Zusammensetzung			
	EN 206-1/ DIN 1045-2		ÜZ

BPG: Bauproduktengesetz

LBO: Deutsche Landesbauordnungen

ÜZ: Übereinstimmungszertifikat durch anerkannte Zertifizierungsstelle

ÜHP: Übereinstimmungserklärung durch Hersteller nach vorheriger Prüfung des Bauprodukts durch anerkannte Prüfstelle

¹⁾ Bauaufsichtlich nicht relevant, Nachweisstufe entspricht ÜZ

²⁾ Bei wesentlichen Abweichungen von Norm hinsichtlich Herstellverfahren, Zusammensetzung und Eigenschaften

Die Anerkennung der PÜZ-Stelle durch das Deutsche Institut für Bautechnik DIBt als zuständige Bauaufsichtsbehörde (**Tafel IV-1**) erstreckt sich insbesondere auf Zemente und zementartige Bindemittel. Weiterhin gilt die Anerkennung für Betonzusatzstoffe und -mittel, Gesteinskörnungen sowie zementhaltige Zubereitungen (z. B. Mauermörtel). Sie bezieht sich sowohl auf genormte als auch auf bauaufsichtlich zugelassene Produkte.

Zum 01.07.2013 wird die neue Bauproduktenverordnung BauPVO vollständig in Kraft treten und die bislang geltende europäische Bauproduktenrichtlinie ersetzen. Stellen, die nach der BauPVO hinsichtlich der Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeurteilung tätig werden wollen, müssen ei-

ne entsprechende Notifizierung bei der nationalen Anerkennungsbehörde beantragen. Dies gilt auch für alle Stellen, die bislang nach der Bauproduktenrichtlinie tätig waren.

Zukünftig wird, zumindest im harmonisierten Bereich, die Akkreditierung der Stellen eine Voraussetzung für ihre Notifizierung sein. Produktzertifizierungsstellen und Zertifizierungsstellen für die werkeigene Produktionskontrolle müssen nach EN 45011 akkreditiert werden, Prüflabore nach EN ISO/IEC 17025. Diese neue Regelung betrifft in Deutschland 234 notifizierte Stellen, die im harmonisierten Bereich der Prüfung und Zertifizierung von Bauprodukten oder entsprechender werkeigener Produktionskontrolle tätig sind.

Tafel IV-2: Übersicht über die von der PÜZ-Stelle im Jahr 2011 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	PÜZ-Stelle	PÜZ-Stelle	577 ¹⁾	58
	DIN 1164	Deutschland					
	Zulassung	Deutschland					
	TL Beton-StB	Deutschland					
	BRL 2601, NEN 3550	Niederlande	privatrechtlich	bmc	PÜZ-Stelle	123	26
	TRA 600, PTV 603, NBN B 12	Belgien					
	Reglement NF	Frankreich					
	DS/INF 135	Dänemark					
Putz- und Mauerbinder	EN 413	Deutschland	gesetzlich	PÜZ-Stelle	PÜZ-Stelle	15	12
	BRL 2601	Niederlande	privatrechtlich	bmc	PÜZ-Stelle	5	4
Hydraulischer Tragschichtbinder	DIN 18506	Deutschland	gesetzlich	PÜZ-Stelle	PÜZ-Stelle	17	17

¹⁾ In diesen Zahlen sind insgesamt 105 Mehrfachzertifikate für identische Zemente sowie 31 bauaufsichtlich zugelassene Zemente enthalten.

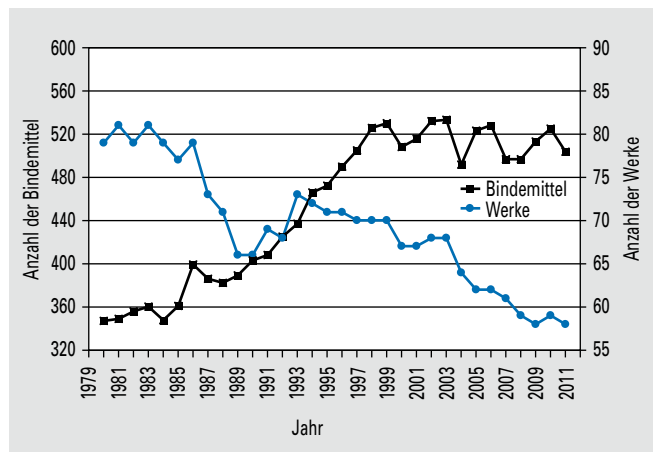


Bild IV-1: Entwicklung der Anzahl der von der PÜZ-Stelle fremdüberwachten Bindemittel und Werke

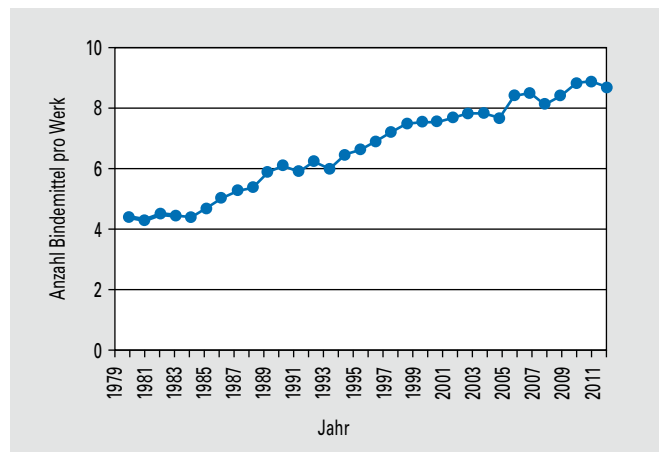


Bild IV-2: Mittlere Anzahl überwachter Bindemittel pro Werk für die von der PÜZ-Stelle überwachten Werke

Die PÜZ-Stelle einschließlich der Labore des VDZ sind bereits seit 2002 akkreditiert. Im Jahr 2011 wurde eine Re-Akkreditierung bzw. eine Erweiterung der Akkreditierung eingeleitet. Die entsprechenden Audits durch die Deutsche Akkreditierungsstelle DAkkS verliefen erfolgreich, sodass in 2012 eine erneute Akkreditierung ausgesprochen wurde. Damit ist die wesentliche Voraussetzung für die zukünftige Notifizierung der PÜZ-Stelle nach BauPVO geschaffen.

Fremdüberwachung von Zement nach gesetzlichen Regelwerken

Tafel IV-2 enthält eine Übersicht über die von der PÜZ-Stelle im Jahr 2011 zertifizierten bzw. überwachten Zemente und hydraulischen Bindemittel. Es wurden 609 Bindemittel aus 58 Werken nach gesetzlichen Regelwerken zertifiziert bzw. überwacht, hierin enthalten waren 577 Zemente,

davon 9 Zemente aus 5 ausländischen Werken. Für 105 der 577 Zemente wurden Mehrfachzertifikate für identische Zemente ausgestellt, d. h. sowohl EG-Konformitätszertifikate nach EN 197-1 als auch Übereinstimmungszertifikate nach DIN 1164-10.

Die Anzahl der überwachten Bindemittel ist im Vergleich zum Jahr 2008 nahezu unverändert geblieben (Bild IV-1). Die mittlere Anzahl der überwachten Bindemittel pro Werk nahm jedoch in den vergangenen 30 Jahren zu und liegt inzwischen bei etwa 8,6 Bindemitteln pro Werk (Bild IV-2).

Außerdem wurden im Jahr 2011 auch 51 Zemente mit Verwendungsgenehmigung für Betonfahrbahnen überwacht. Ferner überwachte die PÜZ-Stelle 15 Putz- und Mauerbinder nach EN 413-1 sowie 17 hydraulische Boden- und Tragschichtbinder nach DIN 18506.

Für die von der PÜZ-Stelle 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 2011 im Vergleich zu 2008 (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 sich die Anzahl der Zemente der Festigkeitsklasse 32,5 verringert und die der Festigkeitsklasse 52,5 erhöht hat. Die Ursache hierfür ist, dass in den letzten Jahren eine Reihe von Zementen der Klassen 32,5 R bzw. 42,5 R in die nächst höheren Festigkeitsklassen 42,5 N bzw. 52,5 N umgestuft wurden.

Die bereits in den letzten Jahren beobachtete Abnahme der Versandmengen von

Tafel IV-3: Anzahl der von der PÜZ-Stelle im Jahr 2011 (2008) 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	28 (36)	78 (78)	80 (61)	186 (175)	5,6 (5,6)	16,6 (16,6)	8,0 (8,0)	30,2 (30,2)
Portlandkompositzement	CEM II	56 (64)	82 (71)	33 (32)	171 (167)	24,3 (24,3)	20,0 (20,0)	4,8 (4,8)	49,1 (49,1)
Hochofenzement	CEM III	49 (56)	46 (44)	6 (8)	101 (108)	7,0 (7,0)	13,4 (13,4)	0,3 (0,3)	20,7 (20,7)
Puzzolanzement	CEM IV	3 (3)	– (–)	– (–)	3 (3)	0,0 (0,0)	– (–)	– (–)	0,0 (0,0)
Kompositzement	CEM V	– (–)	– (–)	1 (1)	1 (1)	– (–)	– (–)	0,0 (0,0)	0,0 (0,0)
Summe		136 (159)	206 (193)	120 (102)	462 (454)	36,9 (36,9)	50,0 (50,0)	13,1 (13,1)	100,0 (100,0)
Zemente mit hoher Anfangsfestigkeit (R)		78 (95)	84 (103)	61 (54)	223 (252)	29,5 (29,5)	26,0 (26,0)	9,0 (9,0)	64,5 (64,5)
Zemente mit üblicher Anfangsfestigkeit (N/L)		58 (64)	122 (90)	59 (48)	239 (202)	7,4 (7,4)	24,0 (24,0)	4,1 (4,1)	35,5 (35,5)
Zemente mit Sondereigenschaften (LH, HS, NA)		46 (46)	51 (48)	13 (7)	110 (101)	keine Angaben			

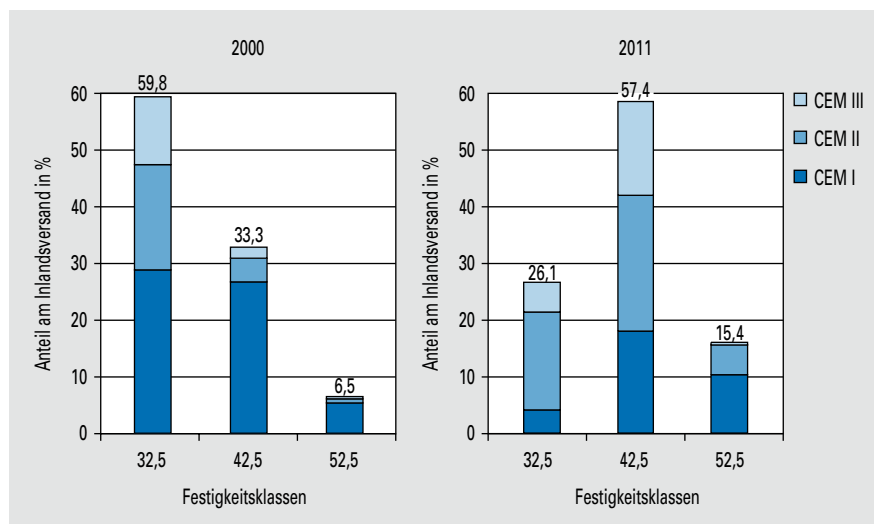


Bild IV-3: Gegenüberstellung der Anteile der Zementarten und Festigkeitsklassen am Inlandsversand der in Deutschland hergestellten Zemente in den Jahren 2000 und 2011

Portlandzementen hat sich weiter fortgesetzt, und der Anteil an Hochofenzementen im Inlandsversand hat zugenommen. Bild IV-3 verdeutlicht die Veränderungen des Inlandsversands verschiedener Zemente. Dargestellt sind die Anteile der Zementarten und Festigkeitsklassen am Inlandsversand des Jahres 2011 und zum Vergleich auch die des Jahres 2000. Der Anteil der Zemente der Festigkeitsklasse 32,5 ist auf 26,1 % zurückgegangen. Gleichzeitig ist der Anteil von Zementen höherer Festigkeitsklassen entsprechend gestiegen.

Eine ähnliche Verschiebung ist bei den Zementarten ersichtlich. Im Zuge der verstärkten Bemühungen zur CO₂-Reduzierung hat der Versandmengenanteil der Portlandzemente deutlich abgenommen. Seit dem Jahr 2000 hat sich ihr Anteil nahezu halbiert und liegt jetzt bei 31,6 %. Gleichzeitig ist der

Anteil der CEM II-Zemente um absolut 23,6 % auf 45,7 % gestiegen. Ebenfalls zugenommen hat der Versandmengenanteil an CEM III-Zementen.

Fremdüberwachung von Zement nach freiwilligen Regelwerken

Zwischen der PÜZ-Stelle und den entsprechenden belgischen, dänischen, französischen, niederländischen und russischen Stellen bestehen seit vielen Jahren bilaterale Vereinbarungen über die gegenseitige Anerkennung von Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungstätigkeiten. Hierbei handelt es sich um Fremdüberwachungen nach nationalen Regelwerken, die über die Anforderungen der EN 197 hinausgehen. Die PÜZ-Stelle führt in Absprache mit den ausländischen Stellen bei deutschen Herstellern die erforderlichen ergänzenden Prüfungen und Überwachungen durch. Da-

durch lässt sich der Zusatzaufwand für die Zementhersteller deutlich reduzieren.

Im Jahr 2011 wurden von der PÜZ-Stelle 123 Zemente und 5 Putz- und Mauerbinde aus 26 Werken nach niederländischen Beurteilungskriterien (BRL 2601) überwacht (vgl. Tafel IV-2). Außerdem zertifizierte und überwachte die PÜZ-Stelle 50 Zemente aus 18 Werken nach belgischen Regelwerken, die zur Führung des belgischen BENOR-Zeichens berechtigen. 44 Zemente aus 15 Herstellwerken wurden nach einem französischen Reglement geprüft und überwacht, um das NF-Zeichen zu erhalten. Nach dänischen Regelwerken wurden im Jahr 2011 10 Zemente aus 7 Werken überwacht und haben ein Dancert-Zertifikat nach DS/INF 135 erhalten.

Weitere Bauprodukte

Die Prüfung, Überwachung und Zertifizierung von Zement und zementhaltigen Bindemitteln bilden nach wie vor den Tätigkeitsschwerpunkt der PÜZ-Stelle. Allerdings wurde die Kompetenz in den letzten Jahren immer weiter ausgebaut und umfasst dadurch mittlerweile auch zahlreiche weitere Bauprodukte.

Beispielsweise wird seit der bauaufsichtlichen Einführung der Pigmentnorm EN 12878 im Jahr 2006 die werkseigene Produktionskontrolle verschiedener Pigmenthersteller zertifiziert und überwacht. Dies betraf im Jahr 2011 die Herstellung von 65 verschiedenen Pigmenten.

Im Jahr 2008 wurde mit der Prüfung, Überwachung und Zertifizierung von Hütten sandmehl nach EN 15167-1 begonnen. Zurzeit überwacht die PÜZ-Stelle drei Hütten sandmehle.

Vergleichsprüfungen

Die europäische Norm 197-2 für die Konformitätsbewertung von Zement fordert, dass Prüfstellen, die mit der Durchführung von Überwachungsprüfungen beauftragt sind, an regelmäßigen Vergleichsprüfungen teilnehmen. Außerdem ergibt sich die Verpflichtung zur regelmäßigen Teilnahme an Vergleichsversuchen infolge der Akkreditierung der Prüflaboratorien des Forschungsinstituts der Zementindustrie nach EN ISO/IEC 17025. Die PÜZ-Stelle nimmt seit vielen Jahren regelmäßig an verschiedenen Ringversuchen teil. Insbesondere die Standardprüfungen für Zement werden mehrmals pro Jahr national und international verglichen.

Beispielsweise werden von einer niederländischen Stelle wöchentliche Vergleichsprüfungen mit einem Referenzzement organisiert, die vierteljährlich ausgewertet werden. Bei jährlichen Treffen von Vertretern der teilnehmenden Fremdüberwachungsstellen werden die Ergebnisse diskutiert. Darüber hinaus werden die Resultate der wöchentlichen Prüfung des Referenzzements in einer Qualitätsregelkarte dokumentiert, um etwaige Schwankungen festzustellen und rasch reagieren zu können.

Außerdem nimmt das Forschungsinstitut der Zementindustrie an der jährlich durchgeführten Zement-Vergleichsprüfung der Association Technique de l'Industrie des Liantes Hydrauliques (ATILH) teil, an der sich regelmäßig rund 180 Prüflaboratorien aus 37 Ländern beteiligen.

Zusätzlich zu diesen internationalen Ringversuchen wurden auch auf nationaler Ebene Vergleichsversuche an Zement und anderen Baustoffen, wie z. B. Flugasche und Betonzusatzmitteln, durchgeführt.

Prüflabor

Im Zusammenhang mit Fremdüberwachungsprüfungen sowie zugehörigen Auftrags- und Vergleichsprüfungen werden jährlich rund 3 700 Bindemittelproben in den Laboren des Forschungsinstituts der Zementindustrie geprüft. Bei durchschnittlich etwa zwölf zu prüfenden Eigenschaften entspricht das über 44 000 Prüfungen. Dieser hohe Probendurchsatz erfordert rationelle Abläufe in den Laboren. Andererseits müssen auch ein konstantes Prüfniveau und eine hohe Prüfqualität sichergestellt werden. Dies wird durch eine hohe Vereinheitlichung der Prozesse und durch ständige Schulungen erzielt. Über Vergleichsprüfungen sowie durch die Akkreditierung wird die Kompetenz der Prüflabore ständig nachgewiesen.

Tafel IV-4: Systeme der Konformitätsbescheinigung nach Bauproduktenrichtlinie

System	Konformitätsbescheinigung	Aufgaben der anerkannten Stelle	Bindemittel
1+	Zertifizierung durch Zertifizierungsstelle	Fremdüberwachung mit Stichprobenprüfung	Zement ¹⁾ PM-Binder
1		Fremdüberwachung ohne Stichprobenprüfung	–
2+	Konformitätserklärung des Herstellers	Erstinspektion und laufende Überwachung	Tragschichtbinder, Baukalk
3		Erstprüfung	–
4		–	–

¹⁾ Normalzement, Zemente mit besonderen Eigenschaften, Spezialbindemittel

Qualitätssicherung ■

Seit April 2001 dürfen Normalzemente, die mit dem CE-Zeichen gekennzeichnet sind, auf dem europäischen Binnenmarkt uneingeschränkt in Verkehr gebracht werden. Die Überwachung dieser Zemente erfolgt gemäß der europäisch harmonisierten Norm EN 197-2 „Konformitätsbewertung“. Ergänzend dazu enthält der CEN-Bericht CEN/CR 14245 Leitlinien für die Anwendung der EN 197-2. Außerdem hat die europäische Sektorgruppe 02 der notifizierten Stellen (Notified Bodies) verschiedene Positionspapiere mit zusätzlichen Hinweisen erarbeitet. Der CEN-Bericht, in deutscher Version als DIN-Fachbericht 197 veröffentlicht, und die Positionspapiere ermöglichen eine einheitliche Anwendung der Überwachungsnorm durch die unterschiedlichen Stellen in Europa. Die diesbezüglichen Erfahrungen der letzten Jahre sind insgesamt sehr positiv.

Konformitätsnachweis nach EU-Bauproduktenrichtlinie

Die Konformitätsbewertungsverfahren für die verschiedenen Baustoffe werden durch die EU-Kommission festgelegt und durch die europäische Normungsorganisation CEN in zugehörigen harmonisierten Normen ausgestaltet. In der Bauproduktenrichtlinie sind vier Systeme der Konformitätsbescheinigung definiert (**Tafel IV-4**). Bei all diesen Systemen muss der Hersteller unter seiner Verantwortung eine werkseigene Produktionskontrolle betreiben. Der Unterschied zwischen den Systemen besteht in dem Grad der Einbindung einer unabhängigen externen Stelle in den Konformitätsnachweis.

Die anerkannte Stelle überwacht entweder die werkseigene Produktionskontrolle (System 2+) oder führt eine Erstprüfung des Produkts durch (System 3). Bei System 4 ist keine Einbindung einer anerkannten Stelle vorgesehen. Regelmäßige Fremd-

überwachungsprüfungen finden nur im Falle einer Produktzertifizierung nach dem System 1+ statt. Diese wird nur für wenige Baustoffe gefordert, beispielsweise für Normalzemente, Zemente mit besonderen Eigenschaften und Sonderbindemittel, da sie eine besonders hohe Bedeutung für die Standsicherheit haben. Für hydraulische Tragschichtbinder ist das System 2+ vorgesehen, bei dem die werkseigene Produktionskontrolle durch eine zugelassene Stelle überwacht wird.

Die Bauproduktenrichtlinie enthält im Unterschied zu vielen anderen entsprechenden europäischen Richtlinien keine direkten Produktanforderungen. Hierzu dienen vielmehr europäisch harmonisierte Produktnormen sowie europäische technische Zulassungen.

Die jeweiligen Normen legen die erforderlichen Nachweise des Herstellers einschließlich durchzuführender Prüfungen mit Prüfhäufigkeiten und -verfahren fest. Der Umfang der durchzuführenden Prüfungen bei der werkseigenen Produktionskontrolle hat sich bei vielen Baustoffen mit der Einführung von harmonisierten Normen erhöht.

Die Konformität von Zement wird entsprechend der Überwachungsnorm EN 197-2 bewertet. Die Norm hat sich bewährt und bildete deshalb auch die Vorlage für entsprechende Festlegungen bei Betonzusatzstoffen wie Flugasche, Silicastaub und Hütensand.

Bauproduktenverordnung

Die EU-Bauproduktenrichtlinie 89/106/EWG wurde 1988 als eine von 26 Richtlinien nach der so genannten „Neuen Konzeption“ – dem „New Approach“ – veröffentlicht. Ziel war der Abbau von Handelshemmnissen innerhalb der EU. Im Mai 2008 unterbreitete die Europäische Kommission einen ersten Vorschlag zur Überarbeitung dieser Richtlinie. Knapp drei Jahre

später, am 04.04.2011, wurde die Bauproduktenverordnung BauPVO als Nachfolgeregelung für die Bauproduktenrichtlinie im Europäischen Amtsblatt veröffentlicht. Teile der Verordnung gelten bereits seit dem 24.04.2011. Am 01.07.2013 wird sie vollständig in Kraft treten und dann die Bauproduktenrichtlinie, die bis dahin vollumfänglich gültig bleibt, ersetzen.

Die Bauproduktenverordnung beschreibt die Pflichten aller an der Liefer- und Vertriebskette beteiligten Wirtschaftsakteure, d. h. von Herstellern, Bevollmächtigten und Importeuren. Diese sind zukünftig beispielsweise verantwortlich für die Erstellung einer Leistungserklärung als Beschreibung der zugesicherten Eigenschaften und als Voraussetzung für die CE-Kennzeichnung. Außerdem legt die Bauproduktenverordnung die Anforderungen an notifizierte Stellen neu fest. Darüber hinaus enthält sie Regelungen zum Verfahren europäischer technischer Bewertungen und zur Marktüberwachung. Außerdem ändern sich einige Begriffe. Beispielsweise wird die bisherige „Konformitätsbewertung“ ersetzt durch eine „Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit“.

Eine weitere wichtige Neuerung in der Bauproduktenverordnung ist die Erweiterung der Grundanforderungen an Bauwerke um den Aspekt „Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen“. Es ist noch nicht klar, in welcher Form diese neue Grundanforderung zukünftig in Normen und Regelwerken konkretisiert werden wird.

Neuordnung des Akkreditierungswesens

Im August 2008 erschien die europäische Verordnung (EG) Nr. 765/2008 über die Vorschriften für die Akkreditierung und Marktüberwachung. Die Verordnung wurde zum 01.01.2010 wirksam und machte eine Neuordnung des deutschen Akkreditierungswesens erforderlich.

In Deutschland existieren sehr viele Zertifizierungsstellen und Laboratorien, die verschiedenste Dienstleistungen anbieten. Zur Beurteilung der Kompetenz und Qualifikation dieser Stellen gab es in der Vergangenheit fünf private Akkreditierungsstellen. Sie hatten unterschiedliche Kompetenz- und Aufgabenschwerpunkte wie beispielsweise die Akkreditierung von Laboratorien, von Prüf- und Zertifizierungsstellen für verschiedene Produkte sowie von Zertifizierungsstellen für Managementsysteme. Zusätzlich existierten neun Bundes- und vier Länderstellen des gesetzlich geregelten Bereichs (Anerkennungsbehörden).

Aufgrund der europäischen Verordnung musste bis zum 01.01.2010 eine einzige deutsche Akkreditierungsstelle geschaffen werden. In Deutschland wurde deshalb ein Akkreditierungsgesetz erlassen, das eine Akkreditierungsgesellschaft vorsieht, die zu gleichen Teilen vom Bund, den Ländern und der Wirtschaft getragen wird. Diese Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH, kurz DAkkS, wurde in Form einer Beileihung von der öffentlichen Hand autorisiert und ist in Deutschland für alle Akkreditierungen im Geltungsbereich der 26 Richtlinien der Neuen Konzeption zuständig.

Marktüberwachung

Die oben bereits genannte europäische Verordnung über die Vorschriften für die Akkreditierung und Marktüberwachung verpflichtet die EU-Mitgliedsländer zu einer neuen und einheitlichen Organisation der Marktüberwachung. Kernpunkt ist die Einführung nationaler Marktüberwachungsprogramme. In Deutschland liegt die Zuständigkeit für die Umsetzung der Marktüberwachung bei Behörden der Bundesländer und dem Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt). Diese können zukünftig nicht nur anlassbezogen, sondern auch stichprobenartig Prüfungen vornehmen. In der Regel wird hierbei zunächst überprüft, ob Bauprodukte die formellen Anforderungen erfüllen (Dokumentenprüfung hinsichtlich der Kennzeichnung etc.). Gegebenenfalls finden auch physikalische und/oder chemische Prüfungen der Produkte statt.

Zusammenarbeit der notifizierten Stellen

In Europa gibt es mehrere hundert notifizierte Stellen, die aus Bereichen mit unterschiedlichsten Traditionen und Erfahrungen stammen. Deshalb ist es wichtig, dass die Normen und Regelwerke in gleicher Weise ausgelegt und angewendet werden. Zu diesem Zweck schreiben die Bauproduktenrichtlinie und die Bauproduktenverordnung eine regelmäßige Teilnahme notifizierter Stellen an einem Erfahrungsaustausch als wesentliche Voraussetzung für die Anerkennung vor.

Entsprechend den Vorgaben der EU-Kommission organisieren die notifizierten Stellen die Zusammenarbeit untereinander selbst. Es bestehen sowohl horizontale als auch sektorbezogene europäische Gremien. Da in Deutschland besonders viele notifizierte Stellen tätig sind, werden die Arbeiten zusätzlich national gespiegelt.

Die PÜZ-Stelle hat sich, wie auch schon in den vergangenen Berichtszeiträumen, re-

gelmäßig an dem Erfahrungsaustausch sowohl innerhalb der relevanten europäischen als auch der nationalen Gremien beteiligt. Hierbei hat sie u. a. maßgeblich an den Positionspapieren für Zement, Flugasche, Silicastaub und Hüttensand mitgewirkt.

Zertifizierung von Managementsystemen

Einige Unternehmen der Zement- und Baustoffindustrie betreiben in Ergänzung zur gesetzlich geforderten werkseigenen Produktionskontrolle Managementsysteme. In den letzten Jahren ist ein deutlicher Trend hin zu integrierten Managementsystemen festzustellen, die die spezifischen Anforderungen bezüglich Qualität (EN ISO 9001), Umwelt (EN ISO 14001), Energie (EN 16001 bzw. EN ISO 50001) sowie Arbeits- und Gesundheitsschutz (OHSAS 18001) gleichzeitig abdecken (**Bild IV-4**). Produkt- und Systemzertifizierung können gemeinsam bewertet werden, auch wenn sie inhaltliche Unterschiede aufweisen. Der Produktzertifizierer ist im gesetzlich geregelten Bereich tätig und kontrolliert die Erfüllung der formalen Normvorgaben. Managementsysteme haben stärker den Charakter eines Führungsinstruments. Der Systemzertifizierer ist hier im privatrechtlichen Bereich tätig und auditiert stichprobenartig und im Dialog das vom Hersteller selbst gewählte System.

Das Forschungsinstitut der Zementindustrie betreibt seit 1996 eine Zertifizierungsstelle für Managementsysteme FIZ-Zert. Diese wurde 1998 für die Zertifizierung von Qualitätsmanagementsystemen akkreditiert. Die Akkreditierung nach EN ISO/IEC 17021 wurde in den letzten Jahren ständig erweitert und umfasst mittlerweile auch die Zertifizierung von Umweltmanagementsystemen, Energiemanagementsystemen sowie Arbeits- und Gesundheitsschutzmanagementsystemen. Für die Kunden von FIZ-Zert ergeben sich hierdurch Synergien bei der gemeinsamen Zertifizierung verschiedener Managementsysteme, der werkseigenen Produktionskontrolle und der hergestellten Produkte.

Der CO₂-Emissionshandel hat für die Unternehmen der Zementindustrie eine sehr hohe Bedeutung. Seit 2004 müssen in allen Zementwerken mit Klinkerproduktion die CO₂-Emissionen gemäß Treibhaus-Emissionshandelsgesetz (TEHG) verifiziert werden. FIZ-Zert führt seitdem auch die Verifizierung von CO₂-Emissionen von Zement- und zum Teil auch von Kalkwerken durch. Hierzu sind mehrere Mitarbeiter des Forschungsinstituts als entsprechende Sachverständige öffentlich bestellt.

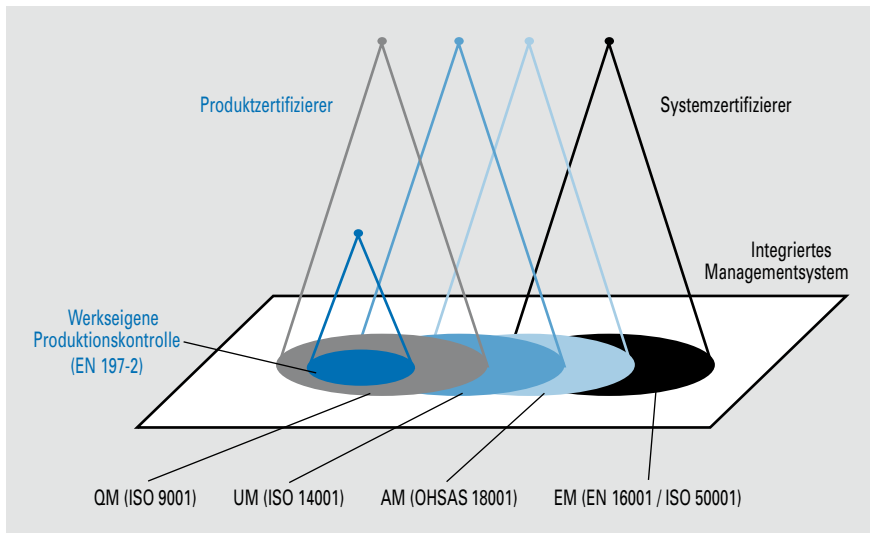


Bild IV-4: Unterschiedliche Sicht von Produkt- und Systemzertifizierern auf integrierte Managementsysteme

Normung ■

Einheitliche und verbindliche Regeln sind wichtig, um die Qualität des Baustoffs Zement und damit die Sicherheit und Dauerhaftigkeit von Bauwerken zu gewährleisten. Schon vor über 130 Jahren gab es deshalb Bestrebungen der Zementindustrie, entsprechende Mindestanforderungen zu definieren und einheitliche Prüfverfahren festzulegen.

Bereits im Jahr 1878 wurde eine erste Zementnorm fertiggestellt und am 15.01.1879 im „Ministerial-Blatt für die gesamte innere Verwaltung in den Königlich Preussischen Staaten“ veröffentlicht. Sie war sicherlich weltweit eine der ersten Normen für Industrieprodukte, und sie hatte den Charme, nur vier Seiten lang zu sein. Darüber hinaus enthielt sie nicht nur die Produkthanforderungen, sondern auch die Beschreibung entsprechender Prüfverfahren. Natürlich schmunzelt man heute über einige Formulierungen. Die Aussage „für das zur einheitlichen Einführung zu bringende Gewicht von 1 Sack wurde 60 kg als das geeignete befunden, weil ein solches Gewicht mit Leichtigkeit zu transportieren ist“ gilt aus Sicht des modernen Arbeits- und Gesundheitsschutzes sicher nicht mehr. Andererseits sind viele damals festgelegte Regeln nach wie vor gültig. Beispielsweise erfolgt die Festigkeitsprüfung auch heute noch „mit 3 Gew. Teilen Normsand auf 1 Gew. Teil Zement nach 28 Tagen Erhärtung“. Einheitliche Apparate und Normalformen zur Herstellung der Prüfkörper wurden empfohlen, „um vollständige Einheitlichkeit bei den Prüfungen zu wahren“. Eine moderne Norm könnte es nicht besser ausdrücken.

Überarbeitung der EN 197-1 und der DIN 1164-10

Das europäische Normungsgremium CEN/TC 51 „Zement und Baukalk“ führt die Tradition der frühzeitigen Zementnormung fort und hat mit der EN 197-1 „Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement“ die erste europäisch harmonisierte Norm für ein Bauprodukt eingeführt. Nach ihrem Erscheinen im Jahr 2000 wurde die Norm mehrfach erweitert. Die A1-Änderung (2004) regelte LH-Zemente mit niedriger Hydrationswärme. In der A3-Änderung (2007) wurden Regelungen zur Verwendung von Flugasche als Zementhauptbestandteil modifiziert. Der Änderungsentwurf prA2 (2006) regelte SR-Zemente mit hohem Sulfatwiderstand, trat aber nicht in Kraft.

Außerdem wurde 2004 die Norm EN 197-4 „Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Hochofenzement mit niedriger Anfangsfestigkeit“ veröffentlicht. Der Änderungsentwurf 197-4/prA1 (2006) mit Regelungen zu CEM III-LH/SR trat nicht in Kraft.

Bei der in den letzten Jahren durchgeführten Revision der EN 197-1 sollten alle Erweiterungen und die EN 197-4 implementiert werden. Allerdings konnte der europaweit erarbeitete Kompromiss zu Zementen mit hohem Sulfatwiderstand (so genannte SR-Zemente, englisch „sulfate resisting common cements“) nicht sämtliche Anforderungen der EU-Mitgliedsstaaten abbilden. Deshalb bestanden viele Länder darauf, entsprechende nationale Regeln beizubehalten. Dies widerspricht jedoch den Vorgaben der Europäischen Kommission. Da die neue EN 197-1 fast 90 %

aller innerhalb der EU gehandelten SR-Zemente abbildet, stimmte die Kommission nach langwierigen Verhandlungen schließlich sowohl der Änderung der EN 197-1 als auch dem Fortbestand der zurzeit geltenden nationalen SR-Regeln zu.

Die EN 197-1 regelt nun zusätzlich zu den 27 Normalzementen auch 7 SR-Zementarten: Portlandzemente mit 3 verschiedenen C_3A -Gehalten, Hochofenzemente mit mindestens 66 M.-% Hüttensand sowie CEM IV-Zemente. National bewährte Zemente, die nicht berücksichtigt wurden, sind im Anhang A der Norm aufgelistet. Sie dürfen zwar nicht mit SR gekennzeichnet, aber weiter verwendet werden.

Neben den SR-Zementen wurden auch Hochofenzemente mit niedriger Anfangsfestigkeit, so genannte L-Zemente (bislang in EN 197-4 geregelt), mit in die Norm aufgenommen. Sie beinhaltet aus deutscher Sicht keine wesentlichen technischen Änderungen. Damit ist es gelungen, die Regelungen für verschiedene Zementarten, mit Ausnahme der NA-Zemente, europäisch zu harmonisieren.

Bei der Revision wurden auch die Anforderungen an Zementzusätze überarbeitet, um Forderungen aus dem Trinkwasserbereich gerecht zu werden. Die in Deutschland hergestellten Zemente haben diese Kriterien auch in der Vergangenheit bereits erfüllt.

Die neue Fassung der EN 197-1 wurde im September 2011 im Europäischen Amtsblatt veröffentlicht, die deutsche Fassung DIN EN 197-1 erschien im November 2011. Innerhalb einer Koexistenzperiode von 21 Monaten, also bis Ende Juni 2013, kann auch die alte Version noch angewendet werden, danach wird ausschließlich die neue DIN EN 197-1 gelten.

Da SR-Zemente zukünftig in EN 197-1 geregelt werden und entgegenstehende nationale Normen zurückgezogen werden müssen, ist auch eine Überarbeitung der DIN 1164-10 „Zement mit besonderen Eigenschaften – Teil 10: Zusammensetzung, Anforderungen und Übereinstimmungsnachweis von Normalzement mit besonderen Eigenschaften“ nötig. Die neue DIN 1164-10 soll nur noch Regelungen zu NA-Zementen (mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt) enthalten und nicht mehr zu HS-Zementen.

Der Entwurf der Norm wurde mit dem neuen Titel „Zement mit besonderen Eigenschaften – Teil 10: Zusammensetzung, An-

forderungen und Übereinstimmungsnachweis von Zement mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt“ veröffentlicht (Erscheinungsdatum 27.02.2012). Die Fertigstellung der Norm ist für 2013 geplant.

Überarbeitung der EN 197-2

Ende 2010 beschloss das zuständige europäische Normungsgremium CEN/TC 51 die Überarbeitung der damals bereits zehn Jahre alten EN 197-2. Da die Erfahrungen mit dieser Norm sehr positiv sind, sollen hauptsächlich notwendige Klarstellungen und nur wenige größere Änderungen vorgenommen werden. Dies sind:

- Eine Anleitung bezüglich der Messunsicherheit bei der Bewertung der Prüfergebnisse
- Die Vorgehensweise bei Nichtkonformität der werkseigenen Produktionskontrolle
- Die Anforderungen an Auslieferungstellen
- Numerische Kriterien für das Bewertungsverfahren für Tonerdezement nach EN 14547
- Ein Hinweis auf den Zusammenhang zwischen der EN 197-2 und den Anhängen ZA der europäischen Produktnormen
- Ein Bild, in dem das Verfahren zur Zertifizierung von Zement in einem neuen Werk oder zur Zertifizierung einer neuen Zementart in einem bestehenden Werk durch eine unabhängige Stelle beschrieben wird

Parallel zur Revision der EN 197-2 sollen auch die Leitlinien für die Anwendung der Norm überarbeitet werden. In Deutschland betrifft dies den DIN-Fachbericht 197.

Hydraulische Tragschichtbinder

Bislang sind hydraulische Boden- und Tragschichtbinder in Deutschland in der DIN 18506 geregelt. Seit mehreren Jahren arbeitet CEN/TC 51/WG 14 an drei entsprechenden Normentwürfen. In EN 13282 Teil 1 sollen schnell erhärtende und in Teil 2 normal erhärtende hydraulische Tragschichtbinder geregelt werden. Teil 3 enthält Regeln zur Konformitätsbewertung.

Die schnell erhärtenden hydraulischen Tragschichtbinder entsprechen weitgehend den Boden- und Tragschichtbindern nach DIN 18506. Für normal erhärtende hydraulische Tragschichtbinder ist dagegen eine variabelere Zusammensetzung mit verschiedenen Bestandteilen möglich. Diese Bindemittel können auch deutlich höhere Anteile an gebranntem Kalk (CaO) enthalten. Da solche Mischungen nicht ohne Weiteres

Tafel IV-5: Prüfnormen der Reihe EN 196 für Zement

DIN EN 196 Teil	Inhalt	Gültige Ausgabe	Entsprechende ISO-Normen
1	Festigkeit	2005	ISO 679
2	Chemische Analyse	2005	ISO 29581-1
3	Erstarren, Raumbeständigkeit	2009	ISO 9597
(4) ¹⁾	Zusammensetzung	2007	–
5	Puzzolanität	2011	ISO 863
6	Mahlfeinheit	2010	–
7	Probenahme	2008	–
8, 9	Hydrationswärme	2010	ISO/DIS 29582-1/-2
10	Wasserlösliches Chromat	2006	–

¹⁾ Veröffentlichung als CEN-Bericht CEN/TR 196-4

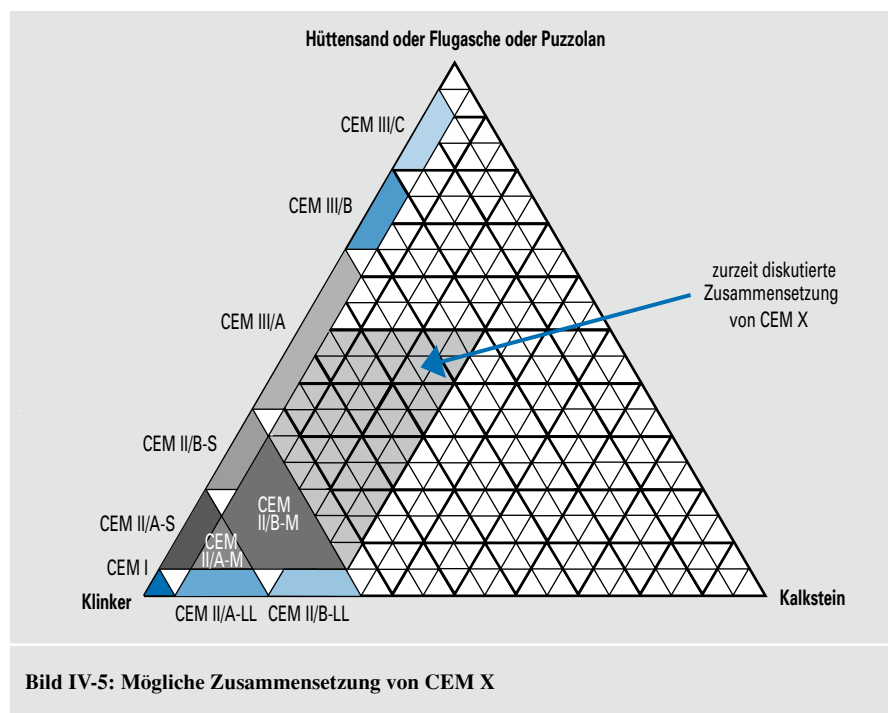


Bild IV-5: Mögliche Zusammensetzung von CEM X

mit den üblichen Prüfverfahren charakterisiert werden können, sieht die Norm das gezielte Löschen der Kalkkomponente vor den eigentlichen Prüfungen vor.

Prüfverfahren

Parallel zu den Produktnormen werden auch die Prüfnormen in regelmäßigen Abständen überarbeitet und aktualisiert. **Tafel IV-5** gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Prüfverfahren der Reihe EN 196. Nicht einbezogen sind in dieser Darstellung die Performance-Prüfverfahren, die gemeinsam mit dem Normungsgremium CEN/TC 104 „Beton und zugehörige Produkte“ entwickelt werden.

Seit 2009 wurden die Prüfnormen zur Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit nach EN 196-3, zur Bestimmung der Puzzolanität von Puzzolanze-

menten nach EN 196-5, zur Bestimmung der Mahlfeinheit nach EN 196-6 sowie zur Bestimmung der Hydrationswärme nach EN 196-8 bzw. nach EN 196-9 weiter entwickelt.

Weitere Bindemittel

In den letzten Jahren wurde eine Reihe von Normen bzw. Normentwürfen für Spezialzemente und Sonderbindemittel entwickelt. Auf dieser Basis können Bindemittel zur Anwendung kommen, die früher entweder nur regional oder nur für spezielle Einsatzgebiete verwendbar waren. Beispiele hierfür sind Zemente mit sehr niedriger Hydrationswärme, die bei Massenbeton zum Einsatz kommen können, sowie Tonerdezemente, die bei speziellen Anwendungen eingesetzt werden können, z. B. als Reparaturmörtel. Weitere genormte Bindemittel sind Putz- und Mauerbinder, Sulfat-

Tafel IV-6: Bestehende und vorgesehene europäische Produktnormen für Zemente und andere hydraulische Bindemittel

Norm-Nr.	Zement-/Bindemittel	Zement-/Bindemittelart		Festigkeits- klasse	Zusätzliche Klassen	Stand
		Anzahl	Bezeichnung			
EN 197-1	Normalzemente	27 (34 in neuer Fassung)	CEM I CEM II CEM III CEM IV CEM V	32,5 N/R 42,5 N/R 52,5 N/R	–	2000, neue Fassung 2011 veröffentlicht, aber noch nicht bau- rechtlich eingeführt
A1	Normalzemente mit niedriger Hydratationswärme				LH (≤ 270 J/g)	2004
prA2	Normalzement mit hohem Sulfatwiderstand		CEM I CEM III/B u. /C CEM IV		SR 0, SR 3, SR 5 SR S SR P	2008, nicht in Kraft getreten
A3	Flugasche als Zementbestandteil					2007
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					2008, nicht in Kraft getreten
offen	Zement mit erhöhten Anteilen an Hüttensand und Kalkstein oder Flugasche		CEM X			Normungsverfahren 2012 eingeleitet
EN 14216	Zemente mit sehr niedriger Hydratationswärme	6	VLH III/B u. /C VLH IV VLH V	22,5	VLH (≤ 220 J/g)	2004, Revision 2012 eingeleitet
EN 14647	Tonerdezement	1	CAC	40	–	2005
EN 15743	Sulfathüttenzement	1	CSS	30 40 50	–	2010
prEN 13282-1 prEN 13282-2	Hydraulischer Tragschichtbinder	2 ¹⁾	HRB	N 1 E 2 N 2 E 3 N 3 E 4 N 4	RS ²⁾	CEN-Umfrage 2012 eingeleitet
EN 413-1	Putz- und Mauerbinder	1	MC	5 12,5 22,5	X (ohne LP-Mittel)	2011
EN 15368	Hydraulischer Binder für nichttragende Anwendungen	1	HB	1,5 3,0	-	2008
A1	Hydraulischer Binder für nichttragende Anwendungen	1	HB	1,5 3,0	-	2010 (Anhang ZA wurde ergänzt)

¹⁾ Deklaration der Zusammensetzung in vorgegebenen Grenzen²⁾ RS = rapid setting (schnell erstarrend)

□ In neuer EN 197-1 enthalten

hüttenzemente und hydraulische Bindemittel für nichttragende Anwendungen.

Tafel IV-6 fasst den derzeitigen Stand der bestehenden und vorgesehenen Produktnormen für Zemente und andere hydraulische Bindemittel zusammen.

CEM X

Angesichts der großen Herausforderung der Zementindustrie hinsichtlich der Senkung von CO₂-Emissionen bei der Zement-

herstellung rücken seit einigen Jahren neue Zemente mit verringertem Klinkergehalt in den Fokus der Normungsarbeit. Ein entsprechendes Normungsprojekt betrifft ternäre Zemente mit den Hauptbestandteilen Klinker, Kalkstein sowie Hüttensand oder natürliches Puzzolan oder kieselsäurereiche Flugasche als dritten Hauptbestandteil. Die Anteile der Hauptbestandteile außer Klinker gehen über die bisherigen Grenzen der EN 197-1 hinaus (**Bild IV-5**). Da das Anwendungsgebiet dieser Zemente noch nicht

feststeht, werden sie in dem laufenden Normungsverfahren bislang als CEM X bezeichnet. Aufbauend auf den in den letzten Jahren erarbeiteten Ergebnissen von Laboruntersuchungen wird die europäische Arbeitsgruppe CEN/TC 51/WG 6 in der nächsten Zeit Vorschläge für die normativen Grenzen der Zusammensetzung, die Bezeichnung der Zemente und die Norm selbst (z. B. EN 197-1 oder 197-5) unterbreiten.



Betonausgangsstoffe und -technologie, Betonbautechnik

85



Foto: Steffen Fuchs/HeidelbergCement

B15n zwischen Schierling und Neufahrn: Betondecke des ersten, 22 km langen Bauabschnitts

Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen ■

Carbonatisierung von Hochofenzementbetonen

In Laborversuchen weisen Hochofenzementbetone im Vergleich zu Portlandzementbetonen erhöhte Carbonatisierungstiefen auf, auch wenn Untersuchungen an Stahlbeton- und Spannbetonbauwerken, die mit Betonen verschiedener Festigkeitsklassen und unterschiedlicher Zusammensetzung hergestellt wurden, bislang bei im Freien bewitterten Bauteilen i. d. R. keinen wesentlichen Einfluss der Zementart auf das Carbonatisierungsverhalten erkennen lassen. Vor diesem Hintergrund wurden die Eigenschaften von Hochofenzementen sowie die charakteristischen Dauerhaftigkeitsmerkmale der aus ihnen erzeugten Betone in Lebensdauerberechnungen aufgenommen. Neuere probabilistische Berechnungen des Carbonatisierungsfortschritts in Betonen mit hüttensandreichen Zementen zeigen eine wesentlich höhere Carbonatisierungstiefe und damit eine potenziell frühere Depassivierung des Bewehrungsstahls, sodass dann die Voraussetzung für eine korrosive Schädigung gegeben ist. **Bild V-1** zeigt als Beispiel die Entwicklung des Zuverlässigkeitsindex eines Stahlbetonbauteils mit einer üblichen Betondeckung für einen Beton mit CEM I-Zement (Portlandzement) und einen Beton mit CEM III/B-Zement (Hochofenzement). Der Zuverlässigkeitsindex ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass nach der betrachteten Dauer der Exposition der Betonstahl noch immer passiviert vorliegt.

Hier zeigt sich das ungünstigere Verhalten eines mit einem CEM III/B hergestellten Betons gegenüber einem mit einem CEM I hergestellten Beton in den probabilistischen Lebensdauerberechnungen. Solche Betone genügen damit immer noch den Anforderungen an die Dauerhaftigkeit in üblichen, von der Norm DIN 1045-2 abgedeckten Anwendungsfällen, werden jedoch ggf. in anspruchsvollen Bauwerken deswegen nicht eingesetzt. Darüber hinaus kann dies auch zu einer schlechteren Akzeptanz von hüttensandreichen Zementen insgesamt führen.

Frühere Untersuchungen im Forschungsinstitut der Zementindustrie hatten gezeigt, dass bei Hochofenzementen die Entstehung von Silicathydrogelen bereits im Verlaufe der Hydratation möglich ist. Diese Silicathydrogele könnten bei ihrer Eintrocknung im weiteren Verlauf der Hydratation ebenso wie die bei der Carbonatisierung von Calciumsilicathydraten im Hochofenzement

stein entstehenden Silicathydrogele zur Bildung von porösen Silicaten führen. Durch diese porösen Silicate könnte das Eindringen von Kohlendioxid in den Hochofenzementstein und somit seine tiefergehende Carbonatisierung begünstigt werden.

Ziel eines im Rahmen der Ausschreibung „Nanotechnologie im Bauwesen – Nano-Texture“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsvorhabens war es daher, durch den gezielten Einsatz von Zementnebenbestandteilen/Additiven, z. B. in Form von reaktiven Aluminiumverbindungen, die Hydratation hüttensandhaltiger Zemente zu beeinflussen und somit in den Gefügebau von Zementstein, Mörtel und Beton bis in den Nanobereich einzugreifen. Diese Einflussnahme zielt darauf ab, verschiedene reaktive Additive „von außen“ zuzuführen und dem hydratisierenden Zement somit beispielsweise die Bildung einer ausreichenden Menge von Aluminosilicaten zu ermöglichen, die die Bildung von Silicathydrogelen vermindern und somit einen Beitrag für ein stabileres und dichteres Gefüge leisten sollen. In diesem Forschungsvorhaben kam es darauf an, die Auswirkungen des Einsatzes der o. g. Additive auf das Betongefüge sowie auf festigkeits- und dauerhaftigkeitsrelevante Eigenschaften, wie insbesondere das Carbonatisierungsverhalten des Betons, zu erfassen. Es sollten außerdem die Ursachen und Randbedingungen für das Carbonatisierungsverhalten von Hochofenzementbetonen sowie die Carbonatisierungsvorgänge im Zementsteingefüge weiter erforscht werden. Dabei sollten neben den Auswirkungen der chemisch/mineralogischen Hüttensandeigenschaften auch granulometrische Einflüsse der Zemente und deren Hauptbestandteile auf das Gefüge betrachtet werden, um ein insgesamt optimiertes Betongefüge zu erzielen.

Aufbauend auf Grundlagenversuchen zur Leistungsfähigkeit der Hochofenzemente (vgl. Kapitel III) wurden Untersuchungen zum Carbonatisierungsverhalten von Hochofenzementbetonen durchgeführt. Die dabei verwendeten CEM III/A- und CEM III/B-Zemente wurden labortechnisch mit einem Klinker-Hüttensand-Massenverhältnis von 50 : 50 bzw. 20 : 80 hergestellt. Um die Auswirkungen unterschiedlicher Additive zu testen, wurden Zemente ohne Additiv sowie mit 5 M.-% Additiv durch getrenntes Mahlen und anschließendes Mischen erzeugt. Als Additive kamen Aluminat (A) und Kalkstein (N) zum Einsatz, in Tastversuchen wurde auch

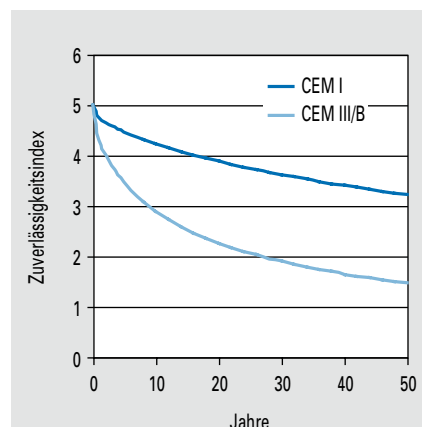


Bild V-1: Zuverlässigkeitsindex der Passivierung der Bewehrung in Beton gegenüber einem Angriff infolge Carbonatisierung in Abhängigkeit von der Expositionsdauer für die Expositions klasse XC4 (typische Außenbauteile) bei einer nominalen Betondeckung von 40 mm und einer Nachbehandlungsdauer von 3 Tagen (Berechnungen des Forschungsinstituts der Zementindustrie)

Tafel V-1: Übersicht der Ausgangsstoffe von Hochofenzementen

Bezeichnung		Feinheit in cm ² /g
Klinkerkomponenten		
C5	CEM I 52,5 R	5 510
C4	CEM I 42,5 R	3 050
E5	CEM I 52,5 R	5 500
Hüttensande		
SI 40	–	ca. 4 000
SII 40	–	ca. 4 000
SI 50	–	ca. 5 000
Additive		
A	Aluminat	Werkzustand
N	Kalkstein	ca. 6 700
C	Calciumhydroxid	Werkzustand

Calciumhydroxid (C) verwendet. Der überwiegende Teil der Versuche wurde unter Verwendung des Klinkers C durchgeführt, der in seiner Herkunft dem Klinker KB im Kapitel III entsprach. Die Hüttensande SI und SII wiesen unterschiedliche Zusammensetzungen auf, wobei bei Hüttensand SI aufgrund seines höheren Aluminiumoxidgehalts eine höhere Leistungsfähigkeit erwartet wurde als bei Hüttensand SII. Der Hüttensand SII wies die gleiche Herkunft auf wie der Hüttensand HS1 in Kapitel III. Eine Übersicht der verwendeten Hauptbestandteile und Additive zeigt **Tafel V-1**.

Mit den Hochofenzementen wurden Betone hergestellt und geprüft. Die Mischungszusammensetzung orientierte sich an den Grenzwerten für die Zusammensetzung und die Eigenschaften von Betonen nach DIN Fachbericht 100 „Beton“. Dies ergab eine Betonzusammensetzung mit einem Wasserzementwert $w/z = 0,65$ und einem Zementgehalt $z = 260 \text{ kg/m}^3$. Für die Herstellung der Betone wurden Gesteinskörnungen (Rheinsand und Rheinkies aus den Beständen des Forschungsinstituts der Zementindustrie) mit der Kornzusammensetzung A16/B16 nach DIN 1045-2, Anhang L verwendet. Die Bestimmung der Carbonatisierungstiefe erfolgte an Betonbalken mit den Abmessungen $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$. Die Probekörper für die 7-Tage-Vorlagerung wurden 1 Tag in der Feuchtkammer, 6 Tage unter Wasser bei $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ (Vorlagerung) und anschließend bei einer Temperatur von $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ und einer relativen Feuchte von $(65 \pm 5) \%$ (Hauptlagerung) gelagert. Die Probekörper für die 28-Tage-Vorlagerung wurden 1 Tag in der Feuchtkammer, dann 27 Tage unter Wasser bei $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ (Vorlagerung) und anschließend bei einer Temperatur von $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ und einer relativen Feuchte von $(65 \pm 5) \%$ (Hauptlagerung) gelagert. Die Carbonatisierungstiefen wurden i. d. R. im Betonalter von 42, 91, 180 und 364 Tagen ermittelt.

Carbonatisierung von CEM III/A-Betonen

Untersucht wurden CEM III/A-Betone, die auf Basis von Zementen mit Klinkerkomponente C in Kombination mit Hüttensand SI bzw. SII hergestellt wurden. Die Bilder V-2 und V-3 zeigen den zeitlichen Verlauf der Carbonatisierungstiefe der Betone.

Bei einem Prüfalter von 364 Tagen wurden an den Betonen, deren Vorlagerung 28 Tage betrug, keine signifikant unterschiedlichen Carbonatisierungstiefen in Abhängigkeit von der Art der eingesetzten Additive ermittelt.

Bei Anwendung der Zemente mit Hüttensand SI wurden gewisse Unterschiede in der Carbonatisierungstiefe ermittelt, wenn die Betone 7 Tage vorgelagert wurden. So wurde bei Einsatz des Additivs A im Vergleich zur Verwendung des Additivs N eine um ca. 1 mm geringere Carbonatisierungstiefe im Alter von 364 Tagen bestimmt. Die Druckfestigkeiten dieser Betone lagen zwischen 37 und 40 N/mm². Bei Anwendung der Zemente mit Hüttensand SII wurden keine wesentlichen Unterschiede in der Carbonatisierungstiefe er-

Bild V-2:
Carbonatisierung von CEM III/A-Betonen ($z = 260 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,65$) bei einer Vorlagerung von 7 bzw. 28 Tagen, Verwendung von Klinker C4 und Hüttensand SI 40 im Zement

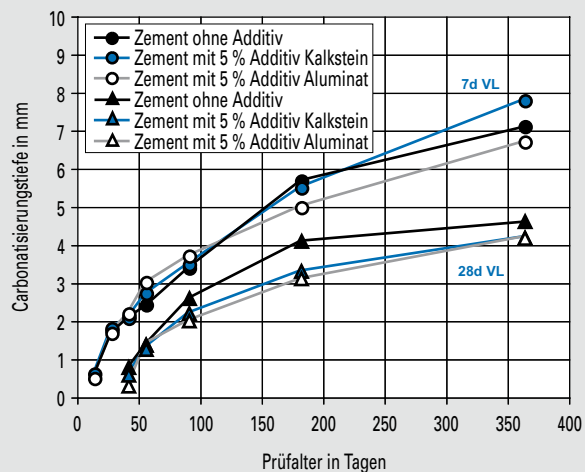
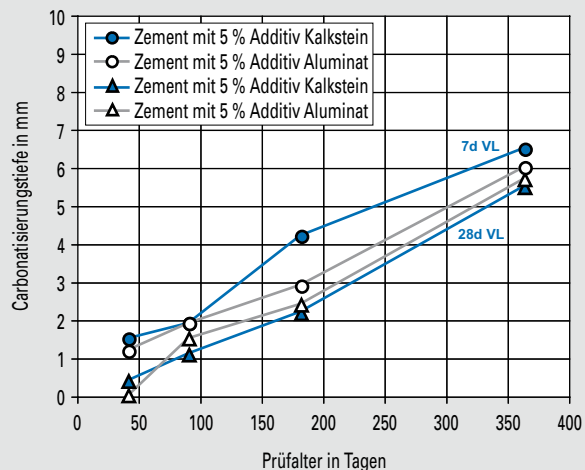


Bild V-3:
Carbonatisierung von CEM III/A-Betonen ($z = 260 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,65$) bei einer Vorlagerung von 7 bzw. 28 Tagen, Verwendung von Klinker C5 und Hüttensand SII 40 im Zement



mittelt. Die Druckfestigkeiten dieser Betone lagen zwischen 37 und 39 N/mm².

Einen deutlich größeren Einfluss auf das Prüfergebnis nach 364 Tagen hatte die Dauer der Vorlagerung. Bei Anwendung der Zemente mit Hüttensand SI wurden im Alter von 364 Tagen Differenzen von bis zu 3 mm in Abhängigkeit von der Vorlagerungsdauer ermittelt. Wurde hingegen der Hüttensand SII verwendet, reduzierten sich die Differenzen der Carbonatisierungstiefen auf etwa 1 mm.

Darüber hinaus hatte die Kombination des verwendeten Hüttensands mit entsprechender Feinheit der Klinkerkomponente gewisse Auswirkungen auf das Niveau der Carbonatisierungstiefe nach 364 Tagen. Bei einer Vorlagerung von 28 Tagen erzielten die Betone auf Basis des Hüttensands SI (kombiniert mit der größeren Klinkerkom-

ponente C4) geringere Carbonatisierungstiefen als bei Verwendung von Hüttensand SII (kombiniert mit feinerem Klinker C5).

In Tastversuchen wurden CEM III/A-Zemente mit Hüttensand SI und dem Additiv A sowohl durch getrenntes als auch durch gemeinsames Mahlen hergestellt. Die Mahlfineinheit beider Zemente betrug etwa 5 550 cm²/g. Ihre 28-Tage-Druckfestigkeit lag jeweils bei ca. 70 N/mm². Die Carbonatisierungstiefe des mit dem Zement aus getrennter Mahlung hergestellten Betons lag im Alter von 364 Tagen bei 6 mm. Der Beton auf Basis des gemeinsam gemahlten Zements wies eine Carbonatisierungstiefe auf von etwa 8 mm auf. Die 28-Tage-Betondruckfestigkeiten lagen bei 49 N/mm² (getrennt) bzw. 41 N/mm² (gemeinsam).

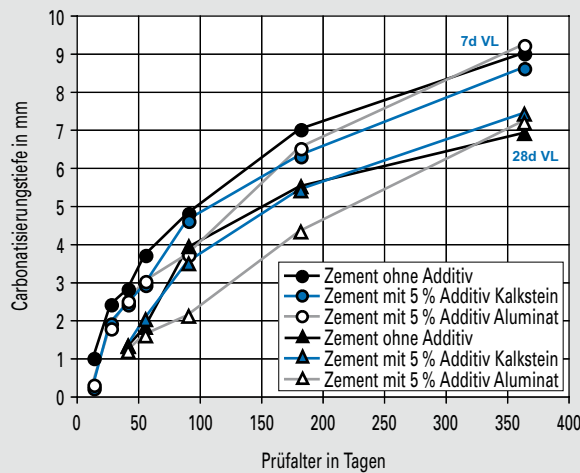


Bild V-4:
Carbonatisierung von CEM III/B-Betonen ($z = 260 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,65$) bei einer Vorlagerung von 7 bzw. 28 Tagen, Verwendung von Klinker C5 und Hüttensand SI 40 im Zement

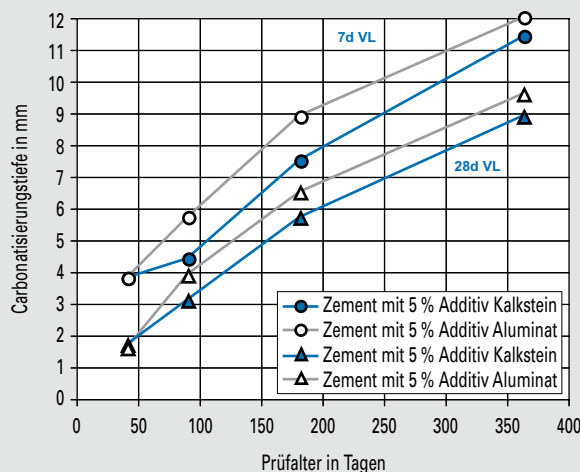


Bild V-5:
Carbonatisierung von CEM III/B-Betonen ($z = 260 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,65$) bei einer Vorlagerung von 7 bzw. 28 Tagen, Verwendung von Klinker C5 und Hüttensand SII 50 im Zement

Carbonatisierung von CEM III/B-Betonen

In den **Bildern V-4** und **V-5** ist der zeitliche Verlauf der Carbonatisierung der CEM III/B-Betone abgebildet, die auf Basis von Zementen mit Klinker C in Kombination mit Hüttensand SI bzw. SII hergestellt wurden.

In Abhängigkeit von der Art der im Zement verwendeten Additive wurden keine signifikanten Auswirkungen auf die Carbonatisierungstiefe der Betone im Prüfalter von 364 Tagen ermittelt. Bei einer Vorlagerung der Betone von 28 Tagen wurden ca. 2 bis 3 mm geringere Carbonatisierungstiefen ermittelt als im Vergleich zu den Betonen mit 7 Tagen Vorlagerung.

Bei Anwendung der Zemente mit Hüttensand SII wurde im Beton nach 364 Tagen

eine um 2 bis 3 mm höhere Carbonatisierungstiefe ermittelt als an den Betonen auf Basis des Hüttensands SI, wenngleich der Hüttensand SII eine um ca. $1000 \text{ cm}^2/\text{g}$ höhere Mahlfeinheit aufwies als der Hüttensand SI.

Die Betone wiesen nach einer Vorlagerung von 7 Tagen Druckfestigkeiten im Bereich zwischen 30 und 32 N/mm^2 (Zemente mit SI) bzw. zwischen 28 und 29 N/mm^2 (Zemente mit SII) auf.

Ergänzend zum bisher dargestellten Versuchsumfang wurden Untersuchungen mit CEM III/B-Zementen und Additiv C durchgeführt. Mit ca. 33 N/mm^2 (mit SI) bzw. 31 N/mm^2 (mit SII) lagen die Betondruckfestigkeiten geringfügig höher als bei den vergleichbaren Betonen mit den Additiven A und N. Die Dauer der Vorlagerung der

Betone hatte einen geringen Einfluss auf die Carbonatisierungstiefe im Alter von 364 Tagen. So wurden an den Betonen mit 28 Tagen Vorlagerung etwa 1 mm geringere Carbonatisierungstiefen ermittelt als an den Betonen mit 7 Tagen Vorlagerung. Im Vergleich zu den Betonen mit den Additiven A und N wurden bei Verwendung des Additivs C nur dann signifikante Unterschiede von ca. 1 bis 2,5 mm festgestellt, wenn der Zement auf Basis des Hüttensands SII verwendet wurde. Bei Anwendung der Zemente mit Hüttensand SI wurden dagegen keine wesentlichen Unterschiede in Abhängigkeit von der Art der verwendeten Additive festgestellt.

Eine weitere Ergänzung bildeten Untersuchungen mit CEM III/B-Zement auf Basis eines Klinkers anderer Herkunft und Qualität (Klinker E). Im Vergleich zum Klinker C hatte Klinker E insbesondere einen höheren Kalkstandard sowie einen höheren Freikalkgehalt. Auf Basis der mit Klinker E, dem Hüttensand SI40 sowie der Additive A und N hergestellten Zemente wiesen die Betone Druckfestigkeiten von rd. 36 bzw. 34 N/mm^2 auf. Im Alter von 364 Tagen wurde an den Betonen mit Klinker E eine um etwa 1 mm höhere Carbonatisierungstiefe ermittelt als an den vergleichbaren Betonen mit Klinker C. Auch an den Betonen mit Klinker E wurden somit keine eindeutigen Unterschiede in Abhängigkeit von der Art der verwendeten Additive festgestellt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die beobachteten Effekte insgesamt hinter den Erwartungen zurückblieben. Die Untersuchungen des Carbonatisierungswiderstands der Mörtel und Betone unter Verwendung optimierter Hochofenzemente mit 50, 65 bzw. 80 M.-% Hüttensand zeigten zwar zum Teil positive Effekte. Die Ergebnisse sind aber nicht grundsätzlich auf alle Zementzusammensetzungen bzw. Klinker-Hüttensand-Kombinationen übertragbar. Verschiedene Additive zeigten – ebenfalls in Abhängigkeit von der Zementzusammensetzung – unterschiedliche Effekte auf das Carbonatisierungsverhalten. Eine gewisse Verringerung der Carbonatisierungsempfindlichkeit von Hochofenzementbetonen wurde – in Abhängigkeit von der Art und dem Anteil der verwendeten Ausgangsstoffe sowie der Prüfbedingungen (z. B. Dauer der Vorlagerung) – beobachtet. Die rechnerische Auswirkung der beobachteten maximalen Differenzen in den Carbonatisierungstiefen auf die Entwicklung des Zuverlässigkeitsindex eines Stahlbetonbauteils mit einer üblichen Betondeckung ist zu überprüfen.

Zemente mit erhöhten Kalksteingehalten – Festigkeitsentwicklung und Dauerhaftigkeit

Einleitung

Die Verwendung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen hat eine lange und erfolgreiche Tradition. Aus dem Ziel, diesen Weg konsequent weiter zu beschreiten, erwächst die Frage nach neuen Zementarten und deren Anwendungschancen. Unter Berücksichtigung der z. T. begrenzten Verfügbarkeit anderer Zementhauptbestandteile rückt die Frage der technischen Leistungsfähigkeit von Zementen mit höheren Kalksteingehalten in den Fokus.

Aus einer im Forschungsinstitut der Zementindustrie durchgeführten Auswertung von Literaturergebnissen und eigenen Untersuchungsergebnissen ging der in **Bild V-6** dargestellte Zusammenhang zwischen dem auf die Betondruckfestigkeit bezogenen Klinkergehalt und der Betondruckfestigkeit hervor. Der spezifische, in diesem Fall auf das Leistungsmerkmal Betondruckfestigkeit bezogene Klinkergehalt nimmt mit steigender Druckfestigkeit ab. Bezogen auf die Druckfestigkeit wird der Klinker in den dargestellten Fällen damit effektiver eingesetzt, wenn die Druckfestigkeit höher ist. Die betontechnischen Gründe für diesen Zusammenhang sind bekannt: Reduzierung des effektiven Wasserzementwerts, Optimierung der Granulometrie der Feinstoffe sowie Einsatz wirksamer Betonzusatzmittel.

Potenziale

kalksteinhaltiger Zemente

Analysiert man in dieser Darstellung beispielhaft den Bereich der Druckfestigkeit von $40 \pm 5 \text{ N/mm}^2$ im Hinblick auf die Zusammensetzung der verwendeten Hauptbestandteile, findet man unter anderem Stoffkombinationen mit relativ geringen Klinkergehalten und sehr hohen Kalksteingehalten.

Kalkstein liegt als Hauptrohstoff des Portlandzementklinkers an jedem Standort eines Zementwerks vor, sodass bei seiner Verwendung als Zementhauptbestandteil Transportkosten sowie mit dem Transport verbundene Emissionen entfallen. Da es sich bei Kalkstein allerdings um ein Inertmaterial handelt, ist eine deutliche Erhöhung seines Anteils im Zement aufgrund der normativ festgelegten Randbedingungen verbunden mit dem derzeit unzureichenden Kenntnisstand nicht ohne weiteres möglich. Darüber hinaus ist die Verkürzung des Themas auf den Aspekt „Druckfestigkeit (im Labor)“ nicht zielfüh-

Bild V-6: Zusammenhang zwischen dem auf die Betondruckfestigkeit bezogenen Klinkergehalt und der Betondruckfestigkeit; Markierter Bereich: Betone mit einer 28-Tage-Betondruckfestigkeit von $40 \pm 5 \text{ N/mm}^2$

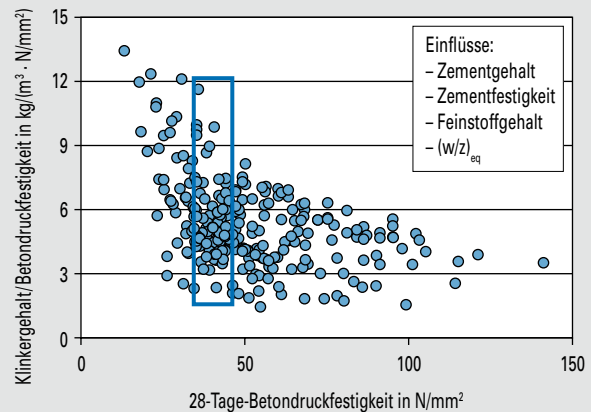
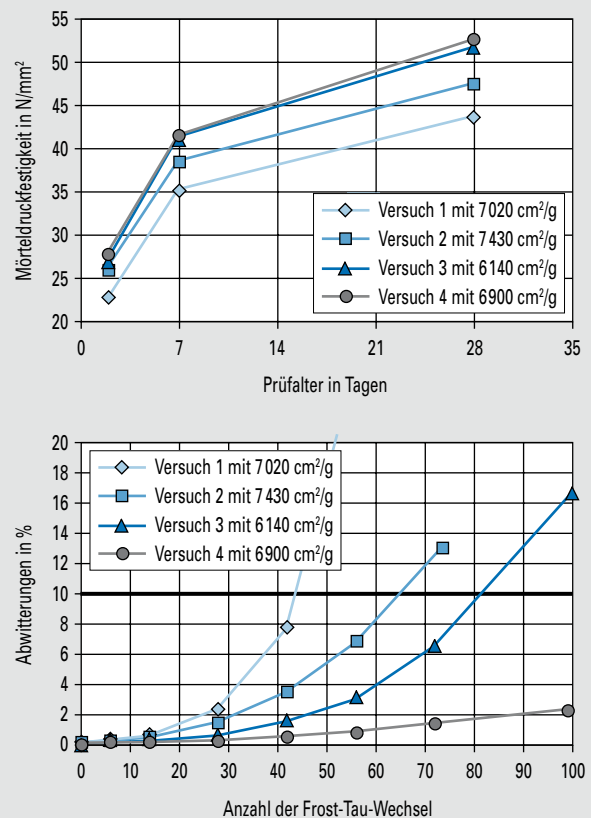


Bild V-7: Festigkeitsentwicklung von Normmörteln und Abwitterung im Würfelverfahren unterschiedlich gemahlener Zemente mit gleicher Zusammensetzung (30 M.-% LL)



rend. Die Gleichmäßigkeit der Betonausgangsstoffe, die Robustheit des Betons im Baubetrieb und vor allem die Dauerhaftigkeit des Betons sind entscheidende Parameter. Dies verdeutlicht das folgende Beispiel: In einer bereits im Forschungsinstitut der Zementindustrie durchgeführten Versuchsreihe wurden die Korngrößen- und Komponentenverteilungen insbesondere auch von kalksteinhaltigen Zementen gezielt optimiert. In **Bild V-7** ist eine Versuchsserie mit CEM II/B-LL Zementen

(30 % Kalkstein) dargestellt. Alle vier Zemente wurden aus denselben Ausgangsstoffen im selben Zementwerk hergestellt. Die Betriebsweise der Mahlanlage bei der gemeinsamen Mahlung der Hauptbestandteile wurde gezielt verändert. Ein Vergleich insbesondere von Versuch 3 und 4 zeigt, dass eine identische Festigkeitsentwicklung nicht zwangsläufig mit vergleichbaren Dauerhaftigkeitsparametern – hier die Abwitterung im Würfelverfahren (Frostwiderstand) – einhergeht.

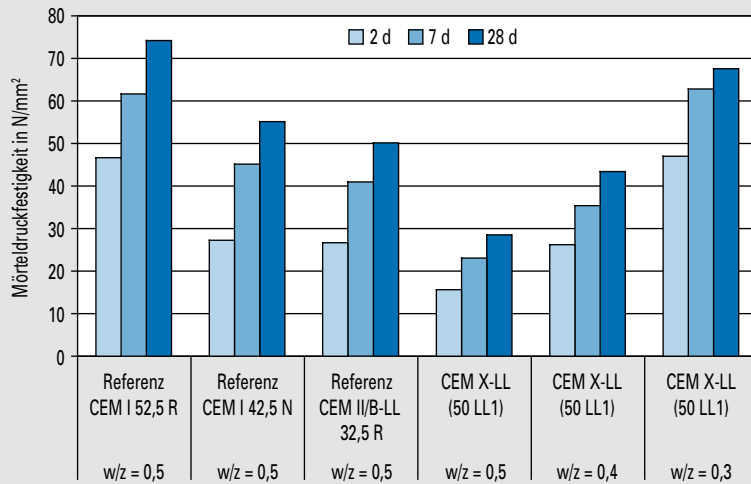


Bild V-8: Festigkeitsentwicklung von Zementen mit konstantem Leimvolumen (Variation der w/z-Werte)

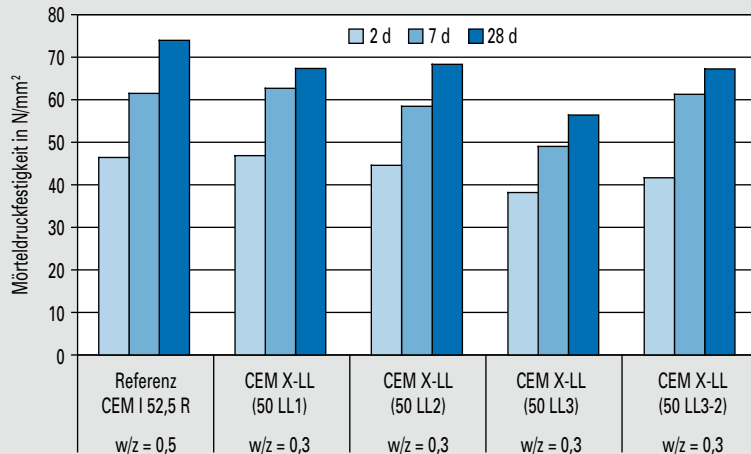


Bild V-9: Festigkeitsentwicklung von Zementen mit konstantem Leimvolumen (Variation der Kalksteinqualität)

Neues Forschungsvorhaben

Hier setzt ein von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördertes Forschungsvorhaben mit dem Titel „Reduzierung der Umweltwirkung der Betonbauweise durch neuartige Zemente und daraus hergestellte Betone“ an. Dieses Projekt wird von den Kooperationspartnern Spenner Zement GmbH, der Technischen Universität Darmstadt und der VDZ gGmbH durchgeführt. Ziel des Forschungsvorhabens ist die labor- und werkseitige Herstellung und Prüfung von Zementen mit Kalksteingehalten jenseits der in DIN EN 197-1 beschriebenen Maximalgehalte. Dabei sollen schwerpunktmäßig Kalksteingehalte zwischen 50 und 70 M.-% eingesetzt werden. Die Auswirkung der Klinkerreduzierung im Zement auf die Festigkeitsentwicklung und die Dauerhaftigkeit von Beton soll untersucht werden. Dabei soll den Auswirkungen dieser Substitution durch Optimie-

rung der Korngrößen- und Komponentenverteilung sowie ggf. eine Anpassung der Betontechnologie begegnet werden.

Stand des Forschungsvorhabens

In Bild V-8 sind erste Ergebnisse zur Festigkeitsentwicklung dargestellt. Alle Mörtel wurden mit konstantem Leimgehalt und über eine gezielte Fließmitteldosierung mit konstantem Ausbreitmaß hergestellt. Der Mörtel mit einem Zement mit 50 M.-% Kalkstein LL1 zeigt bei einem Wasserzementwert von $w/z = 0,4$ eine einem Normmörtel mit CEM II/B-LL 32,5 R vergleichbare Festigkeitsentwicklung. Ein weiteres Absenken des Wasserzementwertes auf $w/z = 0,3$ führt zu einer Festigkeitsentwicklung, die der eines Normmörtels mit CEM I 52,5 R vergleichbar ist.

In Bild V-9 sind die Festigkeitsentwicklungen von Zementen mit 50 M.-% Kalkstein

unterschiedlicher Qualität und Korngrößenverteilung (siehe **Tafel V-2**) und einem Wasserzementwert von $w/z = 0,3$ dargestellt. Auch diese Mörtel wurden mit konstantem Leimgehalt und mit konstantem Ausbreitmaß hergestellt. Kalkstein LL3 und LL3-2 stammen aus dem selben Vorkommen, wurden jedoch unterschiedlich gemahlen. Es ist zu erkennen, dass der Zement mit Kalkstein LL3-2 ähnliche Druckfestigkeiten wie die Zemente mit den Kalksteinen LL1 und LL2 und damit deutlich höhere Festigkeiten als der Zement mit LL3 aufweist. Diese Aussagen gelten ebenfalls bei Wasserzementwerten von $w/z = 0,4$ und $w/z = 0,5$. Die Festigkeitsentwicklung bei Verwendung hoher Kalksteingehalte außerhalb der in DIN EN 197-1 festgelegten Maximalgehalte hängt also weniger von der chemischen Zusammensetzung des Kalksteins, sondern vielmehr von den Korngrößen- und Komponentenverteilungen der Zementhauptbestandteile ab. Eine beispielhafte Korngrößenabhängige Komponentenverteilung zeigt **Bild V-10**. Es wurde für beide Zemente jeweils die gleiche Klinkerkomponente verwendet. Auf der y-Achse ist der Anteil der Zementhauptbestandteile Klinker und Kalkstein der Zemente mit 50 M.-% Kalkstein LL3 bzw. LL3-2 in Abhängigkeit der Korngröße dargestellt. Den mittleren Volumenanteil der Komponenten bezogen auf den gesamten Zement zeigen die Geraden bei 46 Vol.-% Klinker bzw. 54 Vol.-% Kalkstein. Bis zu einer Korngröße von etwa 30 μm liegt der Klinkeranteil des Zements mit LL3-2 deutlich über den im Gesamtsystem enthaltenen 46 Vol.-%, während der Klinker im Zement mit LL3 in diesem Korngrößenbereich etwa in der Gegend des genannten Mittelwerts liegt. Insbesondere auch im Bereich bis 10 μm , der maßgeblich für die Entwicklung der Frühfestigkeit ist, weist der Zement mit LL3-2 deutlich höhere Klinkeranteile bis etwa 70 Vol.-% auf. Die Vernetzung der Hydratationsprodukte in den Korngrößenbereichen bis 10 μm bzw. bis 30 μm wird bei Verwendung des Kalksteins LL3-2 deutlich weniger durch Inertpartikel gestört. Somit kann sich bei ansonsten gleichen Ausgangsbedingungen eine deutlich höhere Festigkeit zu allen Prüfterminen entwickeln. Es ist also von entscheidender Bedeutung, die Korngrößenverteilung aller Hauptbestandteile im Zementwerk aufeinander abzustimmen.

Weiteres Vorgehen

Es konnte gezeigt werden, dass eine gezielte Optimierung der Korngrößen- und Komponentenverteilung von Zementen mit hohen Kalksteingehalten zu einer verbes-

serten Festigkeitsentwicklung führt. Für die Anwendung von Zementen ist jedoch nicht nur die Festigkeitsentwicklung, sondern insbesondere auch die Dauerhaftigkeit von Betonen von Bedeutung. Im nächsten Arbeitsschritt werden entsprechend Betone mit werksseitig produzierten Zementen hergestellt. Die Dauerhaftigkeit wird nach demselben Schema wie die Mörtelfestigkeit geprüft. Es werden also Betone mit Referenzzementen und üblichen Zusammensetzungen solchen mit ausgewählten neuen kalksteinhaltigen Zementen gegenübergestellt. Die Auswirkungen einer Reduzierung des Wasserzementwerts bei gleichzeitiger Optimierung des Leimgehalts und ggf. einer Optimierung der Sieblinie des Betons auf die Dauerhaftigkeit werden untersucht. Geprüft werden der Frostwiderstand mit dem CIF-Verfahren, der Chloridmigrationswiderstand gemäß des BAW-Merkblatts „Chlorideindringwiderstand“ sowie der Widerstand gegen Carbonatisierung von Betonen mit einem Größtkorn von 8 bzw. 16 mm.

Praxisnahe Bewertung

Zum Abschluss des Forschungsvorhabens ist ein Versuch mit einem der werksseitig hergestellten Zemente im Betonwerk geplant. In diesem Rahmen werden die Robustheit von Betonen mit derartigen CEM X-LL Zementen, optimale Mischzeiten, Pumpfähigkeit, Verdichtungsverhalten und ggf. die Sichtbetonqualität analysiert.

Abschließend sollen die Ergebnisse des Forschungsvorhabens ökobilanziell bewertet werden.

Zement und Zusatzmittel ■

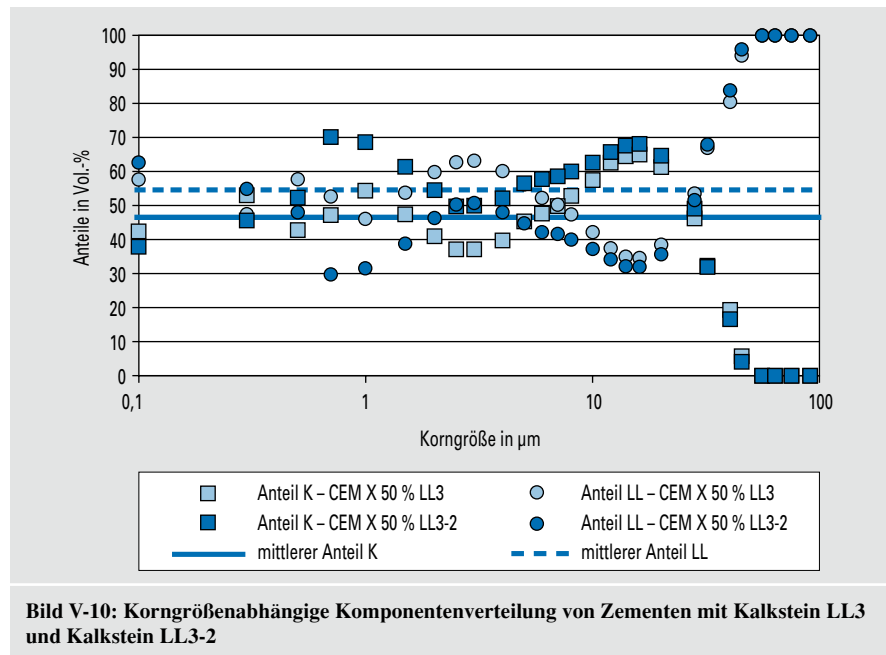
Fließmittel

Etwa 90 % der in Deutschland hergestellten Betone enthalten Betonzusatzmittel. Im Jahr 2009 betrug der Zusatzmittelverbrauch in Deutschland rd. 7 kg/t Zement. Insgesamt stehen in Deutschland derzeit mehr als 550 Betonzusatzmittel zur Verfügung, die 15 unterschiedlichen Wirkungsgruppen zugeordnet sind. Betonverflüssiger (BV) und Fließmittel (FM) bilden mit einem Anteil von rd. 85 % den größten Anteil der eingesetzten Betonzusatzmittel.

Der Einfluss von Betonzusatzmitteln auf die Hydratation von Zement und somit auf die Frisch- bzw. Festbetoneigenschaften wird meist empirisch bestimmt. Über die genauen Wirkungsmechanismen einiger Betonzusatzmittel fehlen weitgehend wissenschaftlich begründete Kenntnisse oder sie werden kontrovers diskutiert. Das gilt ins-

Tafel V-2: Analyse der verwendeten Kalksteinqualitäten

	Kalkstein LL1	Kalkstein LL2	Kalkstein LL3	Kalkstein LL3-2
CaCO ₃ -Gehalt in %	97,8	88,1	79,6	78,0
TOC in %	0,02	0,05	0,09	0,11
Methylenblauwert in g/100g	0,03	0,53	0,63	0,40
Blaine-Feinheit in cm ² /g	4 205	4 190	7 960	4 830
Steigungsmaß n	0,80	0,90	0,70	0,66
Lageparameter d' in µm	20,1	18,9	10,7	23,9



besondere für Fließmittel auf der Basis von Polycarboxylatether, für Schwindreduzierer sowie für neuartige luftporenbildende Betonzusatzmittel. Diese sind Gegenstand umfangreicher Untersuchungen im Forschungsinstitut der Zementindustrie.

Fließmittel

Synthetische organische Polymere mit Carboxylsäuregruppen, wie Polycarboxylatether (PCE), stellen eine Weiterentwicklung auf dem Gebiet der Fließmittelwirkstoffe dar. Etwa 60 % der verwendeten Fließmittel basieren bereits auf PCE – mit steigender Tendenz. PCE bestehen aus Hauptkettenmolekülen, wie z. B. Polyacrylsäure, und Seitenkettenmolekülen, z. B. Polyethylenoxid, die an die Hauptkette gebunden sind. Über die negativ geladene Hauptkette lagern sich die PCE an positiv geladene Oberflächen des Zements und 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 las-

sen sich unterschiedliche Eigenschaften wie eine starke Anfangsverflüssigung bzw. eine verlängerte Verarbeitungszeit des Frischbetons erzielen.

Neben Parametern wie z. B. dem Zugabezeitpunkt, der Mischzeit und der Frischbetontemperatur kann auch der Zement die Wirkung von Fließmitteln beeinflussen. Wie die Praxis zeigt, kann dieselbe Fließmittelart und -menge bei Zementen mit unterschiedlichen Hauptbestandteilen in ungünstigen Fällen zu schnellem Konsistenzverlust, zu Entmischungen, zu intensivem Bluten bzw. zur Verzögerung der Festigkeitsentwicklung führen. Während Erkenntnisse über die Auswirkungen klassischer Fließmittel auf Portlandzement existieren, besteht Forschungsbedarf zu den Wechselwirkungen zwischen Portlandkomposit- bzw. Hochofenzementen und Fließmitteln auf der Basis von Polycarboxylatether.

In einem über die AiF finanziell geförderten Forschungsvorhaben (IGF-Vorhaben-Nr.: 15876 N) wurden im Forschungsinstitut der Zementindustrie die Einflüsse der

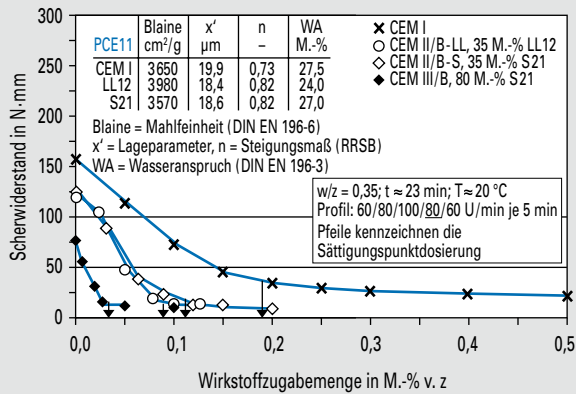


Bild V-11:
Scherwiderstand von Zementleim in Abhängigkeit von der Art und dem Anteil an Hüttensand bzw. Kalkstein im Zement und von der Zugabemenge an Fließmittel-wirkstoff

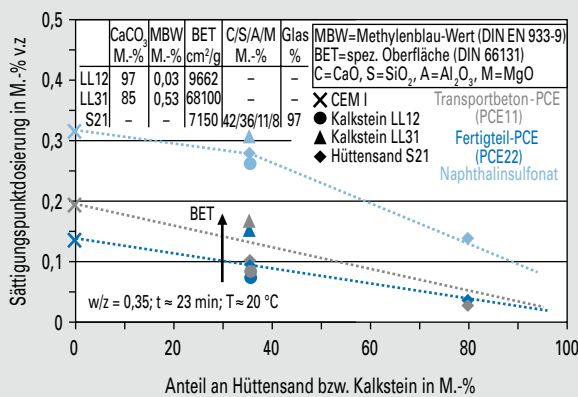


Bild V-12:
Sättigungspunktdosierung von Zementleim in Abhängigkeit von der verwendeten Zement-Fließmittel-Kombination

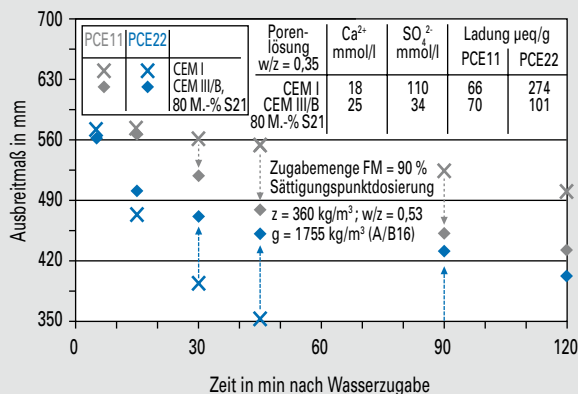


Bild V-13:
Ausbreitmaß von Beton in Abhängigkeit von der verwendeten Zement-PCE-Kombination und der Zeit nach Wasserzugabe

Zementhauptbestandteile Klinker, Hüttensand und Kalkstein auf die Adsorption von Fließmittel untersucht. Die Untersuchungen wurden unter Verwendung von Laborzementen mit gleicher Portlandzementklinker- und Sulfatträgerkomponente und variiertem Anteil an unterschiedlichen Hüttensanden bzw. Kalksteinen durchgeführt. In Verbindung mit rheologischen Messungen wurde ermittelt, ob anhand der Zusammensetzung der Porenlösung und des Zeta-Potentials Rückschlüsse auf die verflüssigende Wirkung von Fließmitteln

unterschiedlicher Wirkstoffart und -struktur gezogen werden können. Ziel war es, Stoffparameter zu ermitteln, die für ein planmäßiges Zusammenwirken zwischen Zement und Fließmittel verantwortlich sind, um z. B. Verfärbungen in Sichtbetonoberflächen infolge von Sedimentation verringern zu können.

Porenlösung und Zeta-Potential

Untersuchungen ergaben, dass mit zunehmender Substitution der Klinker- und Sulfatträgerkomponente durch Hüttensand

oder Kalkstein im Zement die Ionenstärke sowie die Konzentration an Natrium, Kalium und Sulfat in der Porenlösung als Folge des Verdünnungseffekts nahezu linear abnahm. Im Gegenzug erhöhte sich die Calciumkonzentration. Die Veränderung der Ionenstärke bzw. der Zusammensetzung der Porenlösung beeinflusste z. B. die wirksame Ladungsmenge der Fließmittel, in Abhängigkeit der Art und Struktur des Wirkstoffs. Im Vergleich zum Leim mit Portlandzement veränderte sich das Zeta-Potential, als Maß für die Oberflächenladung der Partikel, bei Substitution der Klinker- und Sulfatträgerkomponente von bis zu 35 M.-% durch Hüttensand bzw. Kalkstein nicht signifikant. Bei höheren Anteilen an Hüttensand bzw. Kalkstein im Zement wurde das Zeta-Potential des Leims durch den weiteren Hauptbestandteil wesentlich mitbestimmt. Eine Veränderung im Zeta-Potential kann, z. B. in Verbindung mit einer veränderten wirksamen Ladungsmenge der Fließmittelmoleküle, das Adsorptionsverhalten und die verflüssigende Wirkung von Fließmittel beeinflussen.

Adsorption und verflüssigende Wirkung

Leime, hergestellt mit hüttensand- oder kalksteinhaltigen Zementen, ließen sich mit geringen Zugabemengen an PCE effektiver verflüssigen als der mit Portlandzement hergestellte Leim (Bild V-11). Bild-12 zeigt, dass die für eine maximale Verflüssigung des jeweiligen Zementleims notwendige Zugabemenge an Fließmittel (Sättigungspunktdosierung) mit zunehmender Substitution des Klinkers im Zement sank. Die Fließmittelmoleküle adsorbierten vorrangig an der Klinkerkomponente bzw. an ersten Hydratationsprodukten. Tonige Bestandteile in der Kalksteinkomponente von Portlandkalksteinzementen können, in Abhängigkeit von der Struktur des verwendeten PCE, die Sättigungspunktdosierung erhöhen.

Dauer der Verflüssigung

In Bild V-13 ist das Ausbreitmaß von Beton in Abhängigkeit von der verwendeten Zement-PCE-Kombination über die Zeit nach Wasserzugabe dargestellt. Die zugegebene Menge an PCE betrug stets 90 % der jeweiligen Sättigungspunktdosierung. In Kombination mit einem Portlandzement (CEM I) wiesen beide PCE erwartungsgemäß eine ausgeprägte spezifische Wirkung auf. PCE11 adsorbierte aufgrund seiner geringen wirksamen Ladungsmenge und der hohen Sulfatkonzentration in der Porenlösung (s. Tafel in Bild V-13) nur langsam am Klinker bzw. an ersten Hydratationsprodukten und stand für die Konsistenzhal-

tung entsprechend lange zur Verfügung. PCE22 adsorbierte aufgrund der höheren wirksamen Ladungsmenge wesentlich schneller und in größerem Ausmaß als PCE11. Der Beton zeigte folglich ein ausgeprägtes Rücksteifen.

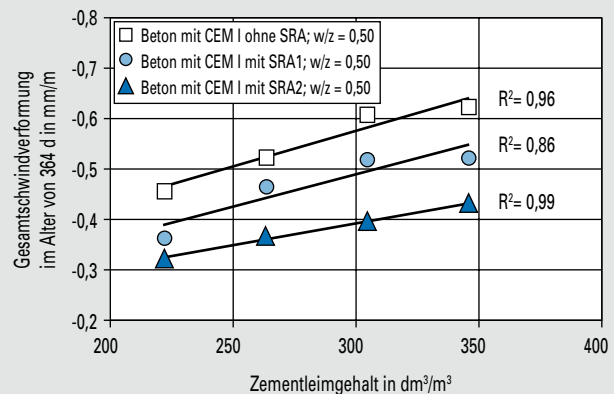
Die spezifische Wirkung beider PCE war in Kombination mit einem Zement mit gleichem Klinker und 80 M.-% Hüttensand (CEM III/B) kaum mehr vorhanden. PCE11 adsorbierte verstärkt aufgrund der Wechselwirkungen mit der Porenlösung, die bei diesem Zement eine wesentlich geringere Sulfat- und höhere Calciumkonzentration aufwies. Deshalb steifte der Beton eher zurück. Die verbesserte Konsistenzhaltung bei Verwendung des CEM III/B in Kombination mit PCE22 war dagegen weniger auf die Interaktionen zwischen der Porenlösung und dem PCE22, sondern überwiegend auf die Reduktion des Klinkeranteils im Zement zurückzuführen. Dadurch wurde im Wesentlichen die reaktive Oberfläche so verringert, dass weniger PCE22 adsorbierte und somit mehr Wirkstoff zur Verflüssigung bereitstand.

Generell sind die Art und Zugabemenge der Fließmittel auf betontechnologische Parameter, wie z. B. die Reaktivität des Zements, den Wasserzementwert, die Frischbetontemperatur und die Dauer bis zum Einbau des Betons, abzustimmen. Ziel ist die optimale Verflüssigung und Verflüssigungsdauer ohne Sedimentation. Eine Überdosierung des Fließmittels bezogen auf den Sättigungspunkt führt zu einer ausgeprägten Sedimentation und zu einer deutlichen Verzögerung der Hydratation des Zements bzw. der Festigkeitsentwicklung des Betons. Die zugegebene Menge an Fließmittel muss deshalb immer unterhalb der Sättigungspunktdosierung liegen, um z. B. der Entstehung von Verfärbungen in Sicht-betonoberflächen vorbeugen zu können.

Schwindreduzierende Zusatzmittel (SRA)

Aufbauend auf den Erkenntnissen des Forschungsvorhabens zu den Wirkungsmechanismen schwindreduzierender Zusatzmittel in Zementstein und Mörtel (vgl. VDZ-Tätigkeitsbericht 2007–2009) wurde ein von der AiF gefördertes Anschluss-Forschungsprojekt durchgeführt (IGF-Nr. 15681 N). In diesem Projekt wurde der Einfluss von SRA auf das Schwinden, die mechanischen Eigenschaften und die Dauerhaftigkeit von Beton untersucht. Es wurden zwei handelsübliche Schwindreduzierer auf Basis von Glykol (SRA1) und Glykolether (SRA2) verwendet.

Bild V-14:
Gesamtschwindverformung im Alter von 364 Tagen von Beton mit $w/z = 0,50$ und mit Portlandzement CEM I in Abhängigkeit vom Zementleimgehalt; Referenz ohne SRA und mit Schwindreduzierer SRA1 bzw. SRA2; Lagerung L2



Einfluss von SRA auf die Eigenschaften von Frischbeton

Die verwendeten Schwindreduzierer hatten keinen wesentlichen Einfluss auf die Konsistenz und den Luftgehalt von Frischbeton mit Portlandzement CEM I, Portlandkompositzement CEM II/B-M (S-L) und Hochofenzement CEM III/A mit Zementgehalten zwischen 270 und 420 kg/m³ bei Wasserzementwerten von $w/z = 0,42$ und 0,50.

Einfluss von SRA auf das Schwinden von Beton

Die Untersuchungen zum unbehinderten (freien) Gesamtschwinden von Beton mit CEM I, CEM II/B-M (S-L) und CEM III/A mit Zementgehalten zwischen 270 und 420 kg/m³ und Wasserzementwerten von $w/z = 0,42$ bzw. 0,50 bei unterschiedlichen Lagerungs-/Trocknungsbedingungen zeigten, dass die schwindreduzierende Wirkung der Schwindreduzierer in Bezug auf Betone ohne Schwindreduzierer unabhängig vom Schwindreduzierer, der Zementart, dem Zementgehalt und dem Wasserzementwert mit zunehmendem Alter abnahm. Die schwindreduzierende Wirkung von Schwindreduzierer SRA2 war in allen Fällen größer als die von Schwindreduzierer SRA1. Schwindreduzierer SRA1 reduzierte das Gesamtschwinden von Beton mit Portlandzement CEM I bei den Lagerungen L1 (1 Tag in Schalung, danach Klima 20/65) und L2 (1 Tag in Schalung, 6 Tage in Wasser, danach Klima 20/65) im Alter von einem Jahr um rd. 11 % bis rd. 21 %. Bei den Betonen, an denen die Untersuchungen über einen Zeitraum von drei Jahren durchgeführt wurden, nahm die Wirkung des Schwindreduzierers im Klima 20/65 weiter ab. Bei einem Zementgehalt von 320 kg/m³ und Lagerung L2 war die Wirkung von Schwindreduzierer SRA1 nach einer Lagerungsdauer von drei Jahren im Klima 20/65 aufgehoben. Schwindreduzierer SRA2 reduzierte das freie Gesamtschwinden im Alter

von einem Jahr um bis zu rd. 39 %. Die Wirkung war jeweils weitestgehend unabhängig von der Zementart, dem Zementgehalt, dem Wasserzementwert und der Lagerungsart.

Die Gegenüberstellung der Gesamtschwindverformung der Betone ohne und mit SRA im Alter von 364 Tagen und dem jeweiligen Zementleim/-steingehalt zeigte, dass die Betone mit SRA im Vergleich zur Referenzprobe bei gleichem Zementleimgehalt deutlich geringere Schwindmaße aufwiesen. Unter Anwendung der in **Bild V-14** (beispielhaft für Beton mit Portlandzement und $w/z = 0,50$) dargestellten Korrelationsgeraden wurde überprüft, wie groß der Zementleim/-steingehalt bei den Betonen mit Schwindreduzierer sein kann, um eine vergleichbare Gesamtschwindverformung aufzuweisen wie die Referenz. Dabei zeigte sich, dass unter Verwendung einer linearen Extrapolation der Zementleimgehalt im Beton ohne SRA um einen Faktor bis zu 1,7 (SRA2, CEM I, $w/z = 0,50$, L2) erhöht werden könnte. Vor diesem Hintergrund kann davon ausgegangen werden, dass Betone mit SRA mit deutlich höherem Zementleim/-steingehalt das gleiche Schwindmaß aufweisen wie zementleimärmere Betone ohne SRA, deren Verarbeitbarkeit aufgrund des geringeren Zementleimgehalts deutlich eingeschränkt ist.

Einfluss von SRA auf die mechanischen Eigenschaften von Betonen

Aus einer Reihe von Veröffentlichungen geht hervor, dass die Druckfestigkeit von Betonen durch SRA reduziert werden kann. Diese Erkenntnisse wurden im Forschungsprojekt weitestgehend bestätigt. Für den Einsatz von Schwindreduzierern in der Praxis ist auf Basis dieser Ergebnisse mit einer Verminderung der Betondruckfestigkeit um bis zu 20 % zu rechnen.

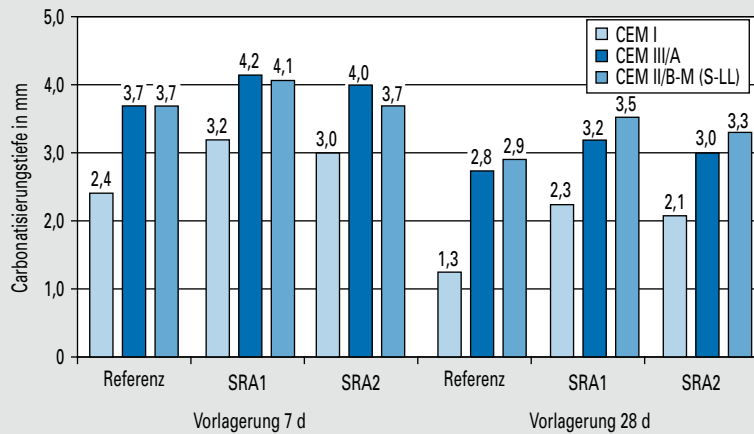


Bild V-15: Carbonatisierungstiefe von Feinbeton mit $w/z = 0,50$ nach 364 Tagen Lagerung im Klima 20/65, Vorlagerung 7 und 28 Tage in Wasser

Die Untersuchungen zum Einfluss von SRA auf die Biegezugfestigkeit zeigte keinen systematischen Einfluss der verschiedenen Schwindreduzierer. Zusammenfassend lässt sich darstellen, dass für den Einsatz von Schwindreduzieren in der Praxis ebenfalls mit einer Verminderung der Biegezugfestigkeit um bis zu 20 % zu rechnen ist.

Der statische Elastizitätsmodul wurde im Vergleich zur Betondruckfestigkeit bzw. Biegezugfestigkeit durch die Schwindreduzierer nur in geringem Maße beeinflusst. Die maximale Abminderung des statischen Elastizitätsmoduls betrug im Alter von 28 Tagen rd. 4 %.

Einfluss von SRA auf die Dauerhaftigkeit von Betonen

Die Carbonatisierungstiefen von Feinbetonen mit Schwindreduzierer waren unabhängig von der Zementart und der Vorlagerungsdauer nach einem Jahr Lagerung im Klima 20/65 zwar größer als die der entsprechenden Referenzproben ohne Schwindreduzierer (**Bild V-15**). Für die Praxis wären dadurch aber kaum Konsequenzen zu erwarten. Der Widerstand gegenüber eindringenden Chloriden von Beton wurde durch die Schwindreduzierer um bis zu 20 % erhöht. Dies kann auf ein verfeinertes Porensystem der Betone mit Schwindreduzierer zurückgeführt werden. Die Untersuchungen zum Einfluss von Schwindreduzierern auf den Frostwiderstand von Beton zeigten, dass die Abwiterungsmengen im CIF-Verfahren insgesamt vernachlässigbar waren. Die Betone mit CEM I und CEM III/A und den verwendeten Schwindreduzierern hielten das von der Bundesanstalt für Wasserbau aufgestellte Kriterium zur Beurteilung des Frostwiderstands von Beton anhand des

relativen dynamischen E-Moduls (> 75 % nach 78 Frost-Tau-Wechsel) ein. Der Beton mit CEM II/B-M (S-LL) und Schwindreduzierer SRA2 hielt das Kriterium nicht ein. Dies zeigt, dass das Ausmaß der inneren Schädigung (relativer dynamischer E-Modul) von der Kombination aus Zement und Schwindreduzierer abhängt. Nach wie vor ungeklärt ist jedoch, inwieweit die in der Laborprüfung gemessene Abnahme des relativen dynamischen E-Moduls als Maßstab für die in der Praxis zu erwartende Schädigung in der Expositionsklasse XF3 – auch bei Verwendung schwindreduzierender Zusatzmittel – herangezogen werden kann. Die Untersuchungen zum Sättigungszustand der Betone zeigten, dass die Betone mit Schwindreduzierer vor der Frost-Tau-Beanspruchung jeweils weniger Prüfflüssigkeit kapillar aufnahmen als die entsprechenden Referenzbetone. Dagegen war der Anteil, der während der ersten 28 Frost-Tau-Wechsel aufgenommen wurde, bei den Betonen mit SRA größer als bei der entsprechenden Referenz. Der theoretische kritische Sättigungsgrad nach Fagerlund von 91 % wurde teilweise überschritten, ohne dass dies mit einer signifikanten inneren Schädigung einherging.

Luftporenbildner

Luftporenbildner (LP-Bildner) sollen im Frischbeton viele kleine gleichmäßig verteilte Luftporen mit einem Durchmesser ≤ 300 μm erzeugen. Im erhärteten Beton dienen die Poren als Ausweichraum zum Abbau des beim Gefrieren der Porenflüssigkeit entstehenden Drucks. Außerdem verringern sie die kapillare Wasseraufnahme. Beide Wirkungsmechanismen zusammen führen zu einem hohen Frost-Tausalz-Widerstand des Betons.

Als Grundstoffe für LP-Bildner werden Seifen aus natürlichen Harzen (Wurzelharze) und synthetische Tenside eingesetzt. Während des Mischens stabilisiert ein Teil der in der Porenlösung gelösten LP-Bildner-Moleküle die durch das Mischen in den Beton eingetragenen Luftblasen. Andere Moleküle sorbieren an Zementpartikel. Dadurch können sich Luftblasen an Zementpartikel anheften und die Stabilität des Luftporensystems wird verbessert. Ein weiterer Teil der Moleküle fällt durch Salzbildung in der Porenlösung aus. Während des Mischvorgangs werden laufend neue Luftporen stabilisiert, bis kein gelöster LP-Bildner mehr in der Porenlösung vorhanden ist. Je nach Wirkstoffart und Zugabemenge des LP-Bildners sind unterschiedlich lange Mischdauern erforderlich, bis der LP-Bildner vollständig aktiviert ist.

Forschung im Forschungsinstitut der Zementindustrie

In der Praxis wurde bei einigen Betondeckenlosen bei Verwendung von LP-Bildnern mit synthetischer Wirkstoffbasis ein stark erhöhter Luftgehalt im Festbeton festgestellt. Untersuchungen im Forschungsinstitut der Zementindustrie mit handelsüblichen LP-Bildnern zeigten, dass eine wesentliche Erhöhung des Luftgehalts dann auftreten kann, wenn der LP-Bildner infolge einer zu kurzen Mischzeit überdosiert wurde, um den angestrebten Luftgehalt einzuhalten. Der Frischbeton enthält dann nicht ausreichend aktivierten LP-Bildner. Bei einem nachträglichen Eintrag von Mischenergie in den Frischbeton, z. B. während des Einbaus durch die Verteilerschnecke des Straßenfertigers, werden weitere Luftblasen stabilisiert und der Luftgehalt steigt an. Ähnliche Effekte sind bei Transportbeton bekannt, bei dem sich der Luftgehalt zwischen Mischwerk und Baustelle, insbesondere bei drehender Trommel, erhöhen kann. Da die Zusammensetzung der handelsüblichen LP-Bildner nicht bekannt war, konnte zunächst der wirkstoffabhängige Einfluss auf die Luftporenbildung nicht ermittelt werden. Daher wurde im Forschungsinstitut der Zementindustrie zusätzlich mit vier reinen Wirkstoffen (natürlicher Wirkstoff: Vinsolharz; synthetische Tenside: Alkylsulfat, Alkylsulfonat, Alkylpolyglycolethersulfat) die Luftporenbildung eines Feinbetons mit 4 mm Größtkorn in Abhängigkeit von der Mischzeit und der Zugabemenge untersucht (**Bild V-16**). Zunächst wurde in einem Vorversuch die Wirkstoff-Zugabemenge ermittelt, um nach einer Mischzeit von zwei Minuten einen Luftgehalt im Frischbeton von rd. 5 Vol.-% zu erzielen (siehe Balken in Bild V-16). Diese Zugabemenge wurde als

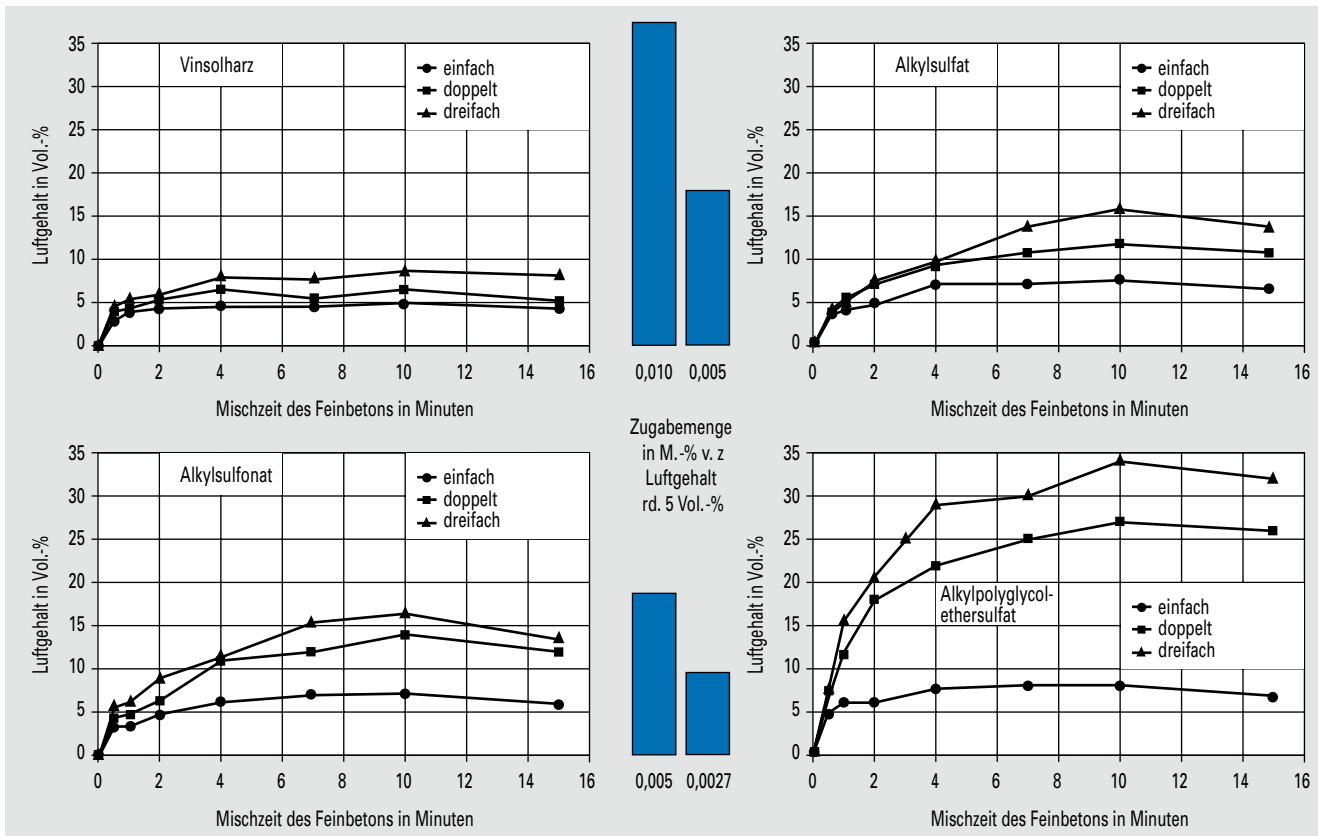
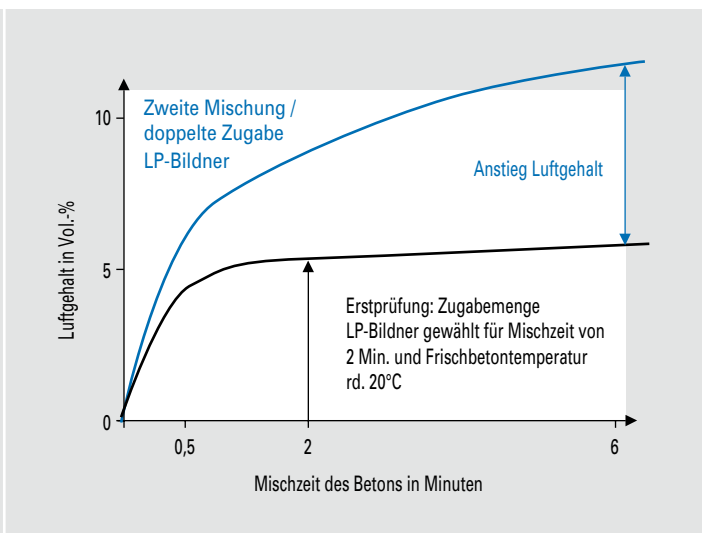


Bild V-16: Luftgehalt des Frischbetons (Feinbeton mit Größtkorn 4 mm) in Abhängigkeit von der Mischzeit und der Zugabemenge des Wirkstoffs

einfache Zugabemenge bezeichnet. Beim natürlichen Wirkstoff Vinsolharz wurden zur Einstellung des Luftgehalts wesentlich höhere Zugabemengen benötigt als bei den synthetischen Tensiden. Anschließend wurde mit einfacher und überhöhter (doppelter und dreifacher) Dosierung die Entwicklung des Luftgehalts in Abhängigkeit von der Mischzeit (30 Sekunden sowie 1, 2, 4, 7, 10 und 15 Minuten) bestimmt. Bei einfacher Zugabemenge zeigte sich unabhängig vom Wirkstoff ein nahezu gleichartiges Verhalten. Der angestrebte Luftgehalt von rd. 5 Vol.-% wurde nach einer Mischzeit von rd. einer Minute erreicht und änderte sich danach nicht mehr wesentlich. Bei überhöhter Zugabemenge zeigte sich ein unterschiedliches, wirkstoffabhängiges Verhalten. Bei dem Zusatzmittel mit natürlicher Wirkstoffbasis stieg der Luftgehalt des Frischbetons bei Überdosierung und verlängerter Mischzeit nur geringfügig von rd. 5 auf rd. 8 Vol.-% an. Die Luftporenbildung war auch schon nach Mischzeiten von rd. einer Minute abgeschlossen. Bei den synthetischen Wirkstoffen stieg der Luftgehalt bei dreifacher Dosierung auf rd. 15 Vol.-% (Alkylsulfat und Alkylsulfonat) und beim Wirkstoff Alkylpolyglycol-ethersulfat sogar bis auf mehr als 30 Vol.-% an. Es waren auch wesentlich längere Mischzeiten erforderlich, bis der gesamte Wirk-

Bild V-17: 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 von Überdosierung und verkürzter Mischdauer



stoff aktiviert war und sich ein konstanter Luftgehalt einstellte. Die Ursache für die wirkstoffabhängige Wirkungsweise liegt darin, dass die synthetischen Tenside eine bessere Löslichkeit aufweisen, während der größte Anteil der natürlichen Wirkstoffe in der Porenlösung unspezifisch ausfällt. Ein Nachaktivierungspotenzial ist daher nur bei synthetischen Tensiden zu erwarten.

Aus den Versuchsergebnissen im Forschungsinstitut der Zementindustrie wurden Vorschläge für eine erweiterte Erstprü-

fung abgeleitet. In der Erstprüfung wird die Zugabemenge des LP-Bildners festgelegt, um den erforderlichen Luftgehalt zu erreichen. Um das Nachaktivierungspotenzial zu überprüfen, muss die dabei ermittelte LP-Bildnermenge verdoppelt und der Luftgehalt der Mischungen mit beiden Zugabemengen bei einer kurzen Mischzeit (30 Sekunden) und nach einer verlängerter Mischzeit (sechs Minuten) bestimmt werden (**Bild V-17**). Bei einem wesentlichen Anstieg des Luftgehalts bei doppelter Zugabemenge und verlängerter Mischzeit besteht

in der Praxis bei der Bauausführung die Gefahr einer Erhöhung des Luftgehalts.

Übertragbarkeit auf die Praxis

Die bisherigen Untersuchungen und Empfehlungen basieren auf Versuchen mit Labormischern (Volumen rd. 0,1 m³). Die Luftporenbildung wird aber u. a. auch durch Mischertyp, Mischungsgröße, Füllmenge und Mischintensität beeinflusst. Die Ergebnisse der Laborversuche können daher nicht unmittelbar z. B. auf die Mischanlage eines Transportbetonwerks (Volumen rd. 2 m³) übertragen werden. Voraussetzung für die zielsichere Herstellung eines anforderungsgerechten LP-Betons ist die Kenntnis der mischzeitabhängigen Luftporenbildung in der Praxis. In einem neuen Forschungsvorhaben des Forschungsinstituts der Zementindustrie soll daher untersucht werden, ob die Ergebnisse von Laborversuchen auch auf praxisübliche Mischervolumen übertragbar sind. Hierzu soll die mischzeitabhängige LP-Bildung am Frisch- und Festbeton im Labor und in einer Mischanlage ermittelt werden. Zusätzlich werden der Einfluss des Zugabe-Zeitpunkts des LP-Bildners und das Nachaktivierungspotenzial durch den Transport im Fahrmischer untersucht. Die Untersuchungen sollen grundlegende Erkenntnisse zu den Wirkungsmechanismen der LP-Bildner bei der Herstellung in einer Mischanlage liefern. Die Kenntnis der Zusammenhänge schützt vor Fehlanwendungen, die z. B. eine zu geringe Festigkeit durch überhöhten Luftgehalt oder einen mangelnden Frost-Tausalz-Widerstand durch ein unzureichendes Luftporengefüge zur Folge haben können.

Alkali-Kieselsäure-Reaktion ■

Änderungen der Alkali-Richtlinie

Der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) veröffentlichte 2010 und 2011 zwei Berichtigungen zur Alkali-Richtlinie, Ausgabe 2007. 2011 wurde damit begonnen, die Richtlinie entsprechend den Strukturen Europäischer Baustoffnormen zu überarbeiten und sie übersichtlicher und verständlicher zu machen. Die Berichtigungen werden dabei integriert. Das Berichtigungsblatt von 2010 setzt die Anforderungen und Maßnahmen für Betonfahrbahndecken (Feuchtigkeitsklasse WS) außer Kraft. Es präzisiert des Weiteren die Anforderungen an Gesteinskörnungen mit Flintanteilen außerhalb des Gewinnungsgebiets nach Teil 2 der Richtlinie. Infolge von AKR-Schäden an Bauwerken in Mitteleuropa wurden mit der zweiten Berichtigung außerdem neue Anforderungen an Kiese aus diesen Regionen festgelegt.

Feuchtigkeitsklasse WS

Bei Bauteilen der Feuchtigkeitsklasse WS handelt es sich um Betonfahrbahnen der Bauklassen SV und I bis III nach RStO. Die Festlegung von Anforderungen für Betonfahrbahnen gehört originär in den Verantwortungsbereich des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), das Anforderungen durch Allgemeine Rundschreiben Straßenbau (ARS) festlegt. Die Anforderungen und Maßnahmen für die Feuchtigkeitsklasse WS wurden deshalb aus der Alkali-Richtlinie herausgenommen und werden durch die TL Beton-StB und durch Allgemeine Rundschreiben Straßenbau (ARS) beschrieben. Für Gesteinskörnungen in der Feuchtigkeitsklasse WS wurden Anforderungen erarbeitet, die aber noch nicht eingeführt sind (siehe Abschnitt WS-Grund- und Bestätigungsprüfung).

Zusätzliche Festlegungen zu Flint

Die Alkali-Richtlinie ist bundesweit für alle Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620 in Verbindung mit DIN 1045-2 anzuwenden. Dadurch entstand die Unsicherheit, wie die Einstufung in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse von Gesteinskörnungen zu erfolgen hat, die Flint enthalten und außerhalb des Anwendungsbereichs von Teil 2 der Alkali-Richtlinie (Teile von Norddeutschland) gewonnen werden. Das Berichtigungsblatt legt präzisierende Kriterien fest, die in vielen Fällen eine einfache Einstufung von Gesteinskörnungen mit Flintanteilen außerhalb des Gewinnungsgebiets von Teil 2 der Richtlinie ermöglichen.

Kiese aus Mitteleuropa

An Betonbauwerken, die mit Kiesen aus Mitteleuropa hergestellt wurden, sind Schäden aufgetreten, bei denen Gutachter eine schädigende AKR als maßgebende Ursache nachgewiesen haben. Bei anschließend durchgeführten Untersuchungen mit verschiedenen Prüfverfahren und der Auswertung petrographischer Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Gesteinskörnungen alkaliempfindlich sein können. Um weitere Schäden zu vermeiden, legte der DAfStb fest, dass diese Gesteinskörnungen in den Teil 3 der Richtlinie aufgenommen werden und danach einzustufen sind.

Neue Gliederung der Richtlinie

Die erste Regelung zur Vermeidung von AKR-Schäden an Betonbauwerken legte der DAfStb mit der „Vorläufigen Alkali-Richtlinie“ 1974 fest. Seitdem wurde die Alkali-Richtlinie um weitere Regionen und Gesteinsarten erweitert. In 2011 strukturierte der DAfStb die Richtlinie entspre-

chend europäischer Normen neu und integrierte die beiden Berichtigungen. Die überarbeitete Richtlinie regelt nun eindeutig die Einstufung aller Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620 in Verbindung mit DIN 1045-2 in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse. Die Einstufung der Gesteinskörnung, die vorbeugenden Maßnahmen und die Prüfverfahren werden in eigenständigen Kapiteln behandelt. Die Prüfverfahren werden in Anhängen beschrieben. Das Kapitel „Einstufung“ ist so aufgebaut, dass als erstes festzustellen ist, ob eine Gesteinskörnung alle Voraussetzungen für eine Einstufung in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E I erfüllt. Werden sie nicht erfüllt, dann muss eine Gesteinskörnung durch weitere Prüfungen eingestuft werden. Die Überarbeitung ist weitgehend abgeschlossen, so dass die überarbeitete Richtlinie voraussichtlich Ende 2012 veröffentlicht werden kann.

WS-Grundprüfung

Das Forschungsinstitut der Zementindustrie erarbeitete gemeinsam mit der Bauhaus-Universität Weimar für den Arbeitskreis 8.2.3 der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) das Konzept einer WS-Grundprüfung, mit der die Eignung grober Gesteinskörnungen für Fahrbahndecken aus Beton der Feuchtigkeitsklasse WS beurteilt werden kann. Gesteinskörnungen, deren Eignung durch diese Prüfung bestätigt wurde, können dann unabhängig vom konkreten Bauvorhaben eingesetzt werden, wenn eine WS-Bestätigungsprüfung an einer aktuellen Probe zeigt, dass sich die Gesteinskörnung nicht unzulässig stark verändert hat.

Derzeitige Situation

Zur Vermeidung einer Schädigung von Betonfahrbahndecken infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) legen die TL Beton-StB 07 und das Allgemeine Rundschreiben Straßenbau (ARS) Nr. 12/2006 des BMVBS Anforderungen fest. Das ARS 12/2006 fordert bei der Verwendung bestimmter Gesteinskörnungen, dass ein AKR-Gutachter bestätigt, dass mit der Gesteinskörnung und dem Beton kein Schaden infolge einer AKR zu erwarten ist. In der Praxis verlangen viele Straßenbauverwaltungen jedoch zwischenzeitlich in jedem Fall und unabhängig von der Art der Gesteinskörnung einen gutachtlichen Nachweis. Dazu wird häufig das AKR-Schädigungspotenzial des Betons in einer AKR-Performance-Prüfung untersucht. Da oft die Zeit für diese Prüfung fehlt, erarbeitete das Forschungsinstitut der Zementindustrie zusammen mit der Bau-

haus-Universität Weimar für den FGSV-Arbeitskreis 8.2.3 das Konzept der WS-Grund- und Bestätigungsprüfung. Es gilt für grobe Gesteinskörnungen, die für Beton der Feuchtigkeitsklasse WS nach TL Beton-StB eingesetzt werden sollen, und beschreibt, wie der Eignungsnachweis zu erbringen ist. Ist die Eignung einer Gesteinskörnung durch eine WS-Grundprüfung nachgewiesen, dann ist zukünftig bei Baumaßnahmen durch eine WS-Bestätigungsprüfung nachzuweisen, dass sich die Gesteinskörnung nicht deutlich verändert hat.

WS-Grundprüfung

Die WS-Grundprüfung beinhaltet zum einen die Prüfung der Alkaliempfindlichkeit der betroffenen Korngruppen eines Werks mit Schnelltests (Referenz- oder Alternativverfahren) nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie des DAfStb (**Bild V-18**). Zur Berücksichtigung natürlicher Schwankungen geschieht dies an Proben von drei Probenahmen, die im Abstand von mindestens vier Wochen durchgeführt werden müssen. Für die weiteren Untersuchungen werden die Korngruppen derjenigen Probenahme verwendet, mit denen die größten Dehnungen in den Schnelltests auftraten. Diese Korngruppen werden dann chemisch/mineralogisch charakterisiert und in einem WS-Betonversuch geprüft.

Das Konzept unterscheidet zwischen einer WS-Grundprüfung für Beton mit einem Größtkorn von 8 mm (Oberbeton (0/8) gemäß TL Beton-StB 07) und für Beton mit einem Größtkorn größer 8 mm (Oberbeton ($D > 8$) und Unterbeton gemäß TL Beton-StB 07), da in Oberbeton (0/8) mindestens 420 kg/m^3 und im Oberbeton ($D > 8$) und Unterbeton nur maximal 360 kg/m^3 Zement verwendet werden. Die Unterscheidung ist erforderlich, weil eine schädigende AKR im Oberbeton (0/8) grundsätzlich wahrscheinlicher ist als beim Oberbeton ($D > 8$) oder Unterbeton. Dies zeigten Vergleichsuntersuchungen mit „Waschbeton 0/8“ (Zementgehalt $z = 430 \text{ kg/m}^3$, Größtkorn 8 mm) und „Standardbeton 0/16“ (Zementgehalt $z = 350 \text{ kg/m}^3$, Größtkorn 16 mm) eines Forschungsvorhabens des Forschungsinstituts der Zementindustrie.

Besteht eine Korngruppe 2/8 die WS-Grundprüfung in einer Betonzusammensetzung für Oberbeton (0/8), dann legt der Gutachter fest, ob die Ergebnisse auch auf die anderen Korngruppen (z. B. 8/16 und 16/22) übertragen werden können. Sollten die Ergebnisse nicht übertragen werden können, dann muss ein zweiter WS-Betonversuch in einer Betonzusammensetzung

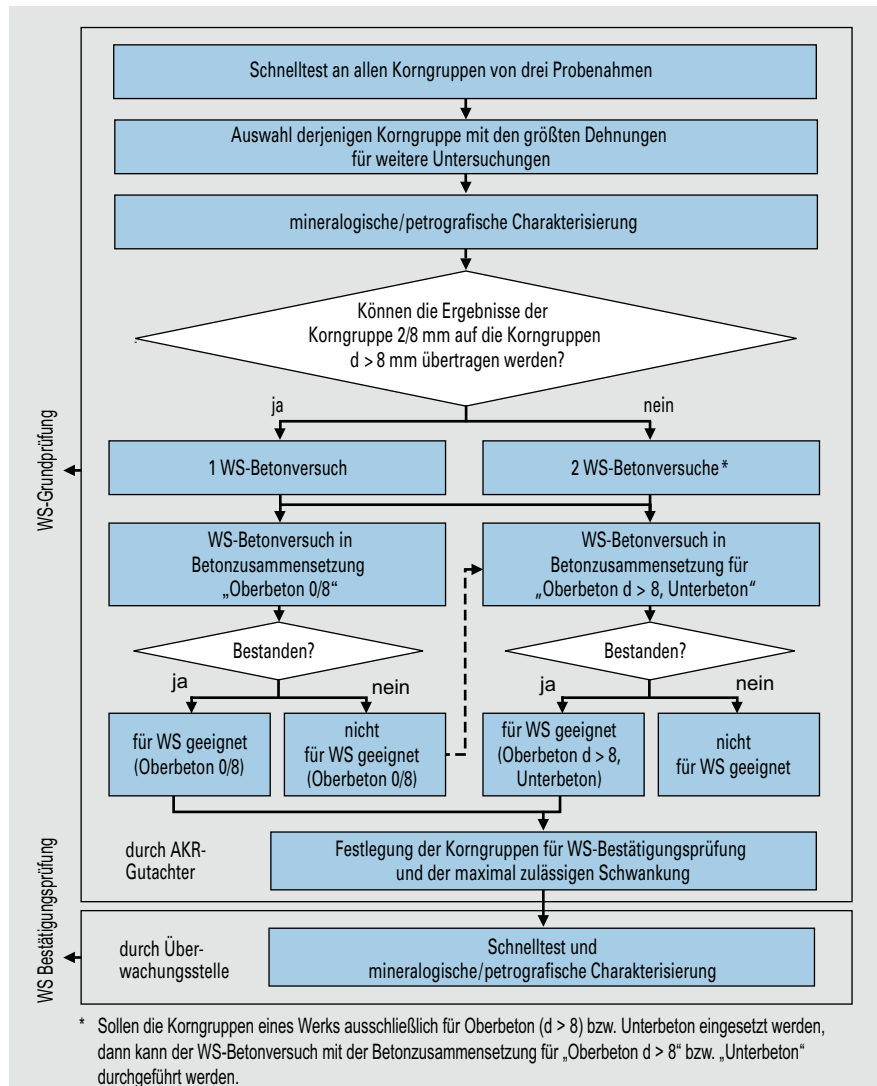


Bild V-18: Ablaufschema der WS-Grundprüfung und WS-Bestätigungsprüfung

für „Oberbeton ($D > 8$) und Unterbeton“ durchgeführt werden und die Eignung der Lieferkörnungen bestätigen.

WS-Bestätigungsprüfung

Bestehen die Korngruppen eines Werks die WS-Grundprüfung, dann können zu späteren Zeitpunkten Korngruppen desselben Werks kurzfristig in einer WS-Bestätigungsprüfung beurteilt und bei ausreichender Übereinstimmung mit den Ausgangswerten für den Bau von Fahrbahndecken der entsprechenden Bauweise eingesetzt werden. Zur Beurteilung der Übereinstimmung werden die aktuellen Proben mittels Schnelltest und chemisch/mineralogisch untersucht. Die Eignung kann entweder regelmäßig durch die Fremdüberwachung oder einmalig vor Betonierbeginn eines Bauvorhabens bestätigt werden.

Die WS-Grund- und Bestätigungsprüfung wird über ein ARS eingeführt.

Erfahrung mit Performance-Prüfungen

Ziel des bis 2013 laufenden IGF-Vorhabens 16569 N ist es, die Bedingungen für eine praxiserichte Bewertung der Alkalienempfindlichkeit von Betonen der Feuchtigkeitsklassen WF und WA empfehlen zu können. Dazu werden Betone entsprechend der Festlegungen zu den vorbeugenden Maßnahmen der Alkali-Richtlinie des DAfStb (**Tafel V-3**) zusammengesetzt und unter Variationen der Prüfbedingungen in AKR-Performance-Prüfungen untersucht. Die Prüfungen sollen Auskunft geben, ob ein Beton mit vorgegebener Gesteinskörnung und vorgegebenem Zement für eine bestimmte Feuchtigkeitsklasse eingesetzt werden kann, sodass keine Gefahr besteht, dass der Beton während der geplanten Nutzungsdauer durch eine AKR geschädigt wird. In der Prüfung wurden die Vorlagerung bis zur Prüfung und die Natriumchloridkonzentration (NaCl) variiert. Die bis Mitte 2012 erzielten Ergeb-

Tafel V-3: Vorbeugende Maßnahmen nach Alkali-Richtlinie des DAfStb

Alkali-empfindlich-keitsklasse	Zement-gehalt in kg/m³	Erforderliche Maßnahmen für die Feuchtigkeitsklasse		
		WO	WF	WA
E I, E I-O, E I-OF, E I-S	ohne Festlegung	keine	keine	keine
E II-O	≤ 330			NA-Zement
E II-O, E II-OF	> 330		NA-Zement	
E III-O, E III-OF			NA-Zement	Austausch der Gesteinskörnung
E III-S	≤ 300		keine	keine
	≤ 350			Performance-Prüfung ¹⁾ oder NA-Zement
	> 350		Performance-Prüfung ¹⁾ oder NA-Zement	Performance-Prüfung ¹⁾ oder Austausch der Gesteinskörnung

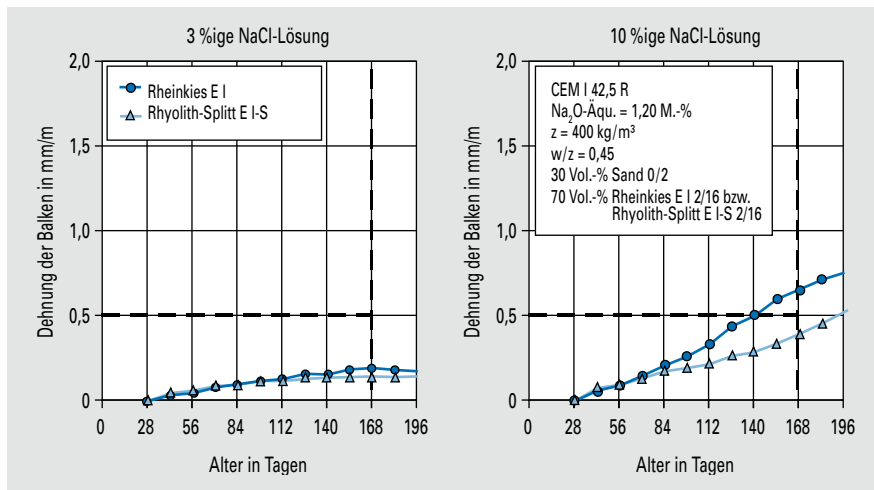
¹⁾ Bis auf Weiteres nur durch Gutachten

Bild V-19: Dehnung unterschiedlicher Betone mit unterschiedlichen groben Gesteinskörnungen im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen durch eine 3%ige (links) und eine 10%ige NaCl-Lösung (rechts)

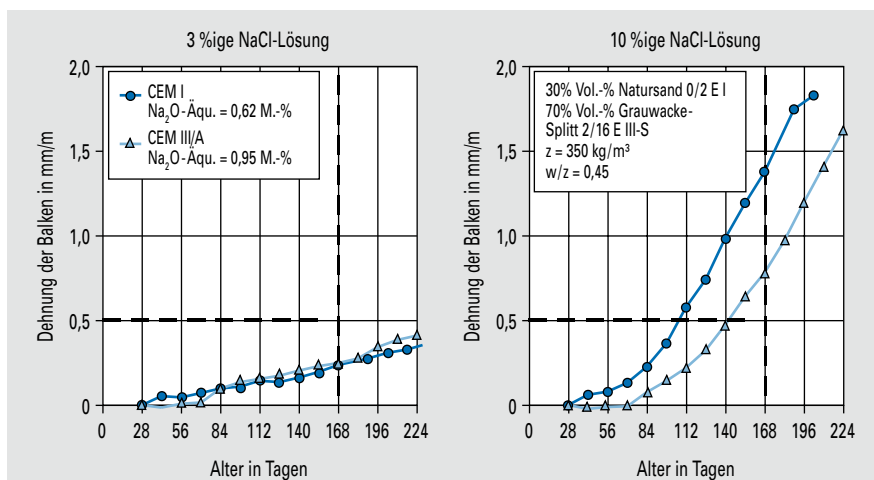


Bild V-20: Dehnung verschiedener Betone mit unterschiedlichen Zementen im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen durch eine 3%ige NaCl-Lösung (links) und eine 10%ige NaCl-Lösung (rechts)

nisse lassen sich in Abhängigkeit von der Feuchtigkeitsklasse wie folgt zusammenfassen:

60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr (Feuchtigkeitsklasse WA)

Die Betone der Feuchtigkeitsklasse WA wurden mit dem „60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr“ von außen geprüft. Die Alkalizufuhr erfolgte durch eine 3%ige bzw. eine 10%ige Natriumchloridlösung. Zur Bewertung der Ergebnisse wurde der Grenzwert für die Dehnung von 0,50 mm/m nach zehn Zyklen Wechsellagerung verwendet, der auch zur Bewertung von Betonen der Feuchtigkeitsklasse WS eingesetzt wird (siehe Abschnitt „Vergleich Performance-Prüfverfahren FIB/VDZ“). Bild V-19 zeigt die Dehnungen von zwei Betonen mit einem Rheinkies E I und einem Rhyolith-Splitt E I-S, die jeweils mit einem CEM I 42,5 R mit einem hohen Alkaligehalt hergestellt wurden. Gemäß Alkali-Richtlinie ist bei Gesteinskörnungen der Alkaliempfindlichkeitsklassen E I und E I-S keine vorbeugende Maßnahme erforderlich. Demnach wird kein AKR-Schaden mit diesen Gesteinskörnungen auftreten, auch wenn der Alkaligehalt des Zements mit einem Na₂O-Äquivalent von 1,20 M.-% hoch ist. Beide Betone bestanden die Prüfung, wenn eine 3%ige NaCl-Lösung verwendet wurde (Bild V-19 links). Die Prüfung mit einer 10%igen NaCl-Lösung war hingegen zu scharf, da die Dehnung des Betons mit Rheinkies E I oberhalb des Grenzwerts lag und dieser Beton als nicht geeignet bewertet werden würde.

In Bild V-20 sind die Dehnungen von Betonen mit einem Grauwacke-Splitt E III-S dargestellt, der bei einem Zementgehalt von 350 kg/m³ gemäß Alkali-Richtlinie nur mit NA-Zementen verwendet werden darf. Der verwendete Portlandzement CEM I wies ein Na₂O-Äquivalent von 0,62 M.-% auf und lag damit an der Grenze zum NA-Zement. Der CEM III/A (Laborzement) erfüllte die Anforderung für einen NA-Zement mit einem Na₂O-Äquivalent mit 0,95 M.-%. Beide Betone bestanden mit einer 3%igen NaCl-Lösung die Prüfung. Bei einer 10%igen NaCl-Lösung waren die Dehnungen deutlich größer und lagen über dem Grenzwert. In diesem Fall würden die Betone unsachgemäß bewertet und von einer Verwendung ausgeschlossen werden, obwohl sie nach Alkali-Richtlinie eingesetzt werden dürften. Die Prüfung mit einer 10%igen NaCl-Lösung würde deshalb die Alkaliunempfindlichkeit nicht entsprechend der Alkali-Richtlinie abbilden. Aufgrund der oben dargestellten Ergebnisse werden im Folgenden die Ergebnisse von

Betonversuchen mit einer 3%igen Natriumchloridlösung dargestellt.

Das Verfahren schließt damit praxisbewährte Betone nicht unverhältnismäßig aus, muss aber auch reaktive Betone identifizieren. **Bild V-21** zeigt an Einzelbeispielen, dass die Dehnungen von Betonen mit einer E III-S-Gesteinskörnung und 370 kg/m^3 CEM I 32,5 R (Na_2O -Äqu. = $0,89 \text{ M.-%}$) bzw. 430 kg/m^3 CEM I 42,5 N (Na_2O -Äqu. = $0,62 \text{ M.-%}$) deutlich oberhalb des Beurteilungskriteriums lagen. Beide Betone dürften gemäß der Alkali-Richtlinie nicht eingesetzt werden. Die E III-S-Gesteinskörnung müsste gegen eine alkaliunempfindliche Gesteinskörnung (E I, E I-S, E I-O, E I-OF) ausgetauscht werden. Wurde beim Beton mit 370 kg/m^3 Zement ein NA-Zement (Na_2O -Äqu. = $0,56 \text{ M.-%}$) eingesetzt, dann bestand der Beton auch mit der E III-S-Gesteinskörnung die Prüfung. Im Einzelfall kann durch den Einsatz eines NA-Zements die Prüfung bestanden werden. Generell gilt dies jedoch nicht. Der Beton mit 430 kg/m^3 Zement würde auch mit einem NA-Zement die Prüfung nicht bestehen (**Bild V-21** links).

Bei Beton mit einer E III-S-Gesteinskörnung und 300 kg/m^3 Zement sind keine Maßnahmen anzuwenden und der Alkaligehalt des Zements ist nicht begrenzt. **Bild V-22** links zeigt, dass das Prüfverfahren unbekannte Lösungen ohne Praxisbewährung auf der sicheren Seite liegend bewerten würde. Es kann vorausgesetzt werden, dass bei einem höheren Zementgehalt von 350 kg/m^3 dieser Beton deutlich durch die Prüfung fallen würde. In diesem Fall würde das Prüfverfahren dann ebenfalls die Alkali-Richtlinie richtig abbilden, da ein NA-Zement einzusetzen wäre.

Die Dehnung im 60°C -Betonversuch mit Alkalizufuhr stellt sich im Bereich des Grenzwerts ein, wenn anstelle eines NA-Zements ein Laborzement CEM II/B-V mit 31 M.-% Flugasche verwendet wurde (**Bild V-22** rechts). Enthielt der CEM II/B-V nur 21 M.-% Flugasche, wurde der Versuch deutlich nicht bestanden.

60 °C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr (Feuchtigkeitsklasse WF)

Die Betone der Feuchtigkeitsklasse WF wurden mit dem „60 °C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr“ geprüft. Der Prüfablauf entspricht dem 60 °C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie. In einigen Fällen lagerten zusätzliche Betonprismen nach dem Ausschalen für 27 Tage in dem Edelstahlbehälter, der für den 60 °C-Betonversuch verwendet wird, bei 20°C und einer rela-

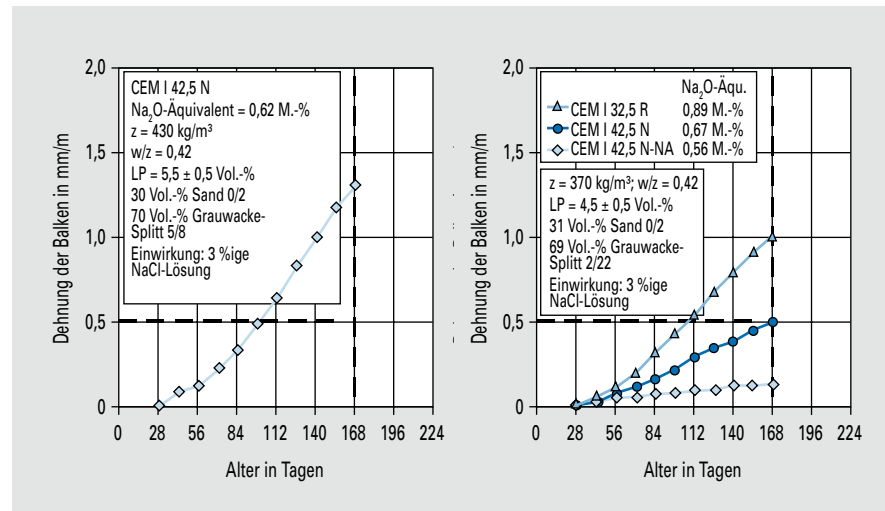


Bild V-21: Dehnung unterschiedlicher Betone mit Grauwacke-Splitt (E III-S) im 60°C -Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen durch eine 3%ige Natriumchlorid-Lösung

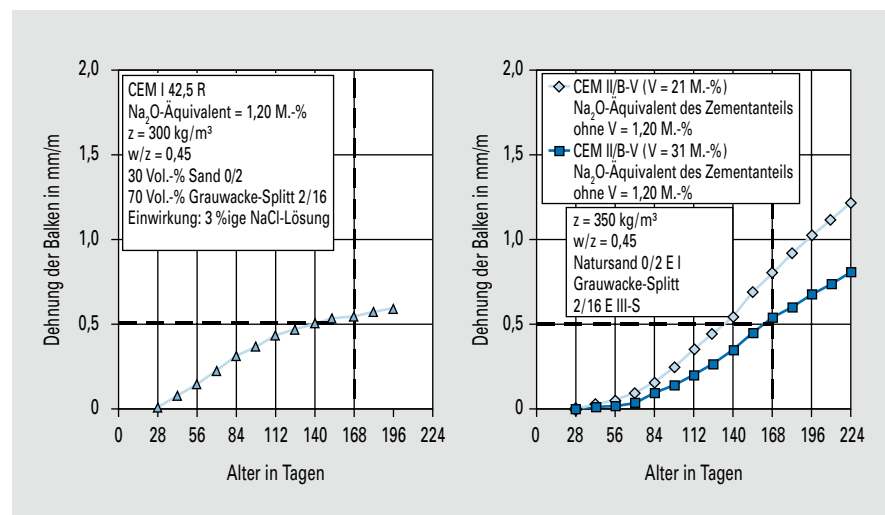


Bild V-22: Dehnung eines Betons mit Grauwacke-Splitt (E III-S) im 60°C -Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen durch eine 3%ige Natriumchlorid-Lösung

tiven Feuchte von 100% . Die Prüfung bei 60°C begann bei diesen Prismen im Alter von 28 Tagen. Vor der Einlagerung wurde die Nullmessung bei 20°C durchgeführt. Die Prüfungen wurden als bestanden bewertet, wenn die Dehnungen 140 Tage nach Beginn der Lagerung bei 60°C $\leq 0,20 \text{ mm/m}$ betrugen. Dieser Grenzwert wurde in Anlehnung an AFNOR P 18-456 gewählt. Bei Betonen mit Portlandflugaschezement wurde die Dehnung in Anlehnung an AFNOR P 18-456 zusätzlich mit dem Grenzwert von $0,30 \text{ mm/m}$ nach 52 Wochen verglichen.

Beton mit alkaliunempfindlichen Gesteinskörnungen der Alkaliempfindlichkeitsklassen E I und E I-S bestanden den 60°C -Betonversuch, auch wenn der Zementgehalt mit 400 kg/m^3 und das Na_2O -Äquivalent des Zements mit $1,20 \text{ M.-%}$ hoch waren

(**Bild V-23** links). In beiden Fällen bildete das Prüfverfahren die Festlegung der Alkali-Richtlinie richtig ab, die für die Alkaliempfindlichkeitsklassen E I und E I-S keine Anforderungen an den Alkaligehalt des Zements und den Zementgehalt festlegt.

Das **Bild V-23** rechts zeigt die Dehnungen von Betonen, die mit dem Grauwacke-Splitt E III-S, einem Zementgehalt von 370 kg/m^3 und in Kombination mit verschiedenen Zementen hergestellt wurden. Die Alkali-Richtlinie legt für diesen Fall fest, dass ein NA-Zement eingesetzt werden muss. Mit dem Prüfverfahren konnte gut zwischen Betonen mit verschiedenen Zementen und Alkaligehalten unterschieden werden. In der vorliegenden Materialkombination und Betonzusammensetzung könnte ggf. auf die Verwendung eines NA-Zements verzichtet werden.

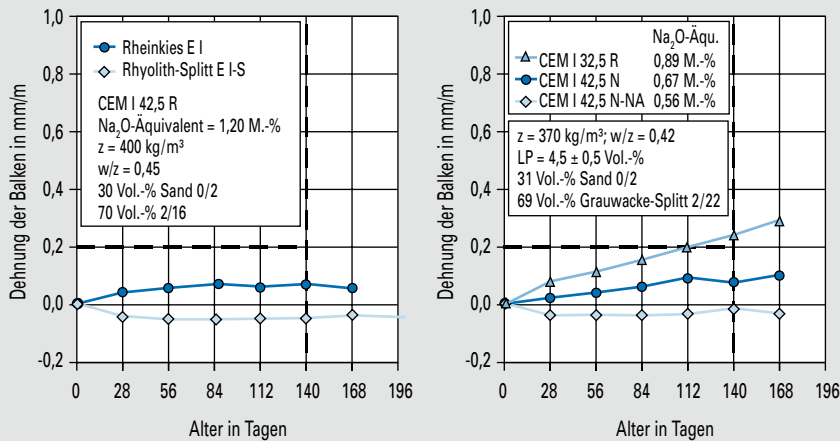


Bild V-23: Dehnung unterschiedlicher Betone im 60 °C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr; links: Beton mit Gesteinskörnungen der Alkaliempfindlichkeitsklassen E I und E I-S; rechts: Betone mit Grauwacke-Splitt (E III-S) und unterschiedlichen Portlandzementen

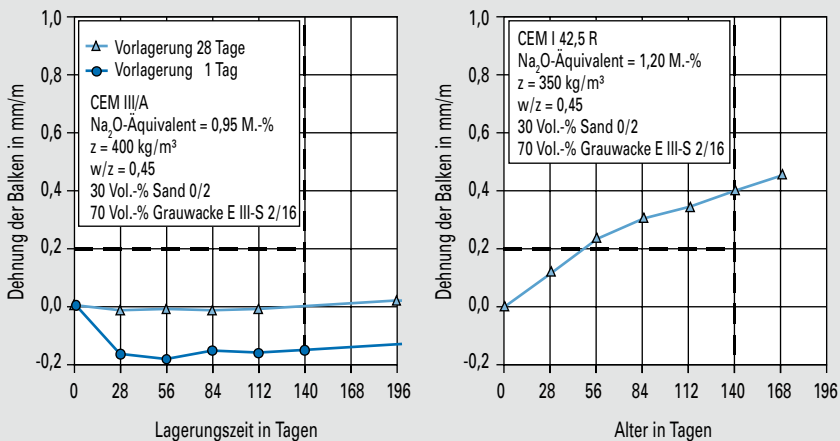


Bild V-24: Dehnung unterschiedlicher Betone mit Grauwacke-Splitt (E III-S) im 60 °C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr; links: Beton mit CEM III/A und verschiedenen Vorlagerungen bei 20 °C und 100 % relativer Feuchte; rechts: Beton mit 350 kg/m³ CEM I 42,5 R und hohem Na_2O -Äquivalent

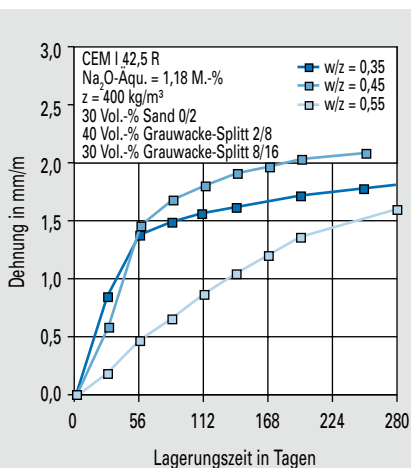


Bild V-25: Dehnung von Betonen mit verschiedenen Wasserzementwerten im 60 °C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr

Auch Beton mit einem hüttensandhaltigen Laborzement, der die Anforderungen an NA-Zemente nach DIN 1164-10 erfüllt, bestand die Prüfung und wurde entsprechend der Alkali-Richtlinie bewertet (**Bild V-24** links). Bei hüttensandhaltigen Zementen zeigte der Beton innerhalb der ersten 28 Tage zunächst Schwindverformungen, wenn er im Alter von einem Tag in die Prüfruhe bei 60 °C über Wasser eingelagert wurde. Würde eine Dehnung infolge AKR in den ersten 28 Tagen auftreten, dann könnte nicht mehr zwischen dem Schwinden und der AKR-Dehnung differenziert werden. Wurde dem Beton durch eine Vorlagerung von 28 Tagen Zeit gegeben bei 20 °C und 100 % relativer Feuchte zu hydratisieren, dann wurde die Schwinddehnung deutlich verringert, wenn dieser ab dem Alter von 28 Tagen bei 60 °C ge-

prüft wurde. Bei Betonen mit hüttensandhaltigen und flugaschehaltigen Zementen ist eine Vorlagerung von 28 Tagen u. a. auch aus diesem Grund zu empfehlen.

Bei einer E III-S-Gesteinskörnung und 350 kg/m^3 Zement sind gemäß Alkali-Richtlinie keine Maßnahmen anzuwenden. Bild V-24 rechts zeigt die Dehnung von einem ungünstig zusammengesetzten Beton, die oberhalb des Grenzwerts lag. Dieses Ergebnis kann als Beleg dafür herangezogen werden, dass das Prüfverfahren unbekannte Lösungen ohne Praxisbewährung auf der sicheren Seite liegend bewerten würde.

Einfluss von Betondichte auf AKR bei einer Alkalizufuhr von außen

Im IGF-Vorhaben 15248 N untersuchten das Forschungsinstitut der Zementindustrie und die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) den Einfluss der Gefügeeigenschaften von Beton auf den Ablauf einer schädigenden AKR. Ausgangspunkt des IGF-Vorhabens war die Feststellung, dass Betonfahrbahndecken aus den 1960er Jahren im Gegensatz zu Decken, die ab den 1980er Jahren mit Gleitschalungsfertigern gebaut wurden, bei z. T. vergleichbarer Betonzusammensetzung keine Schäden infolge einer AKR aufwiesen. Ziel des IGF-Vorhabens war es, zu klären, ob durch eine gezielte Beeinflussung des Betongefüges eine Schädigung infolge einer AKR vermindert bzw. verhindert werden kann.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Wasserzementwert den Ablauf einer schädigenden AKR in Laborprüfungen nicht systematisch beeinflusst. Es gibt zwei gegenläufige Tendenzen. Zum einen dehnten sich in Laborprüfungen ohne eine Alkalizufuhr von außen die Betone mit niedrigen Wasserzementwerten von 0,35 und 0,45 früher und schneller als jene mit einem Wasserzementwert von 0,55 (**Bild V-25**). Sie wiesen zudem die höchsten Maximaldehnungen auf, wobei sie je nach Gesteinskörnung beim Wasserzementwert von 0,45 oder 0,35 auftraten (**Bild V-26**). Im Vergleich zu den Wasserzementwerten 0,45 und 0,35 traten beim Wasserzementwert von 0,55 die Dehnung von Balken und die Rissentwicklung am 30-cm-Würfel verzögert auf (keine Abbildung). Im Gegensatz dazu waren die maximale Rissweite am 30-cm-Würfel in der Nebelkammer (**Bild V-26**) sowie die Dehnung der Balken im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr (**Bild V-27**) bei geringem Wasserzementwert am kleinsten. Daraus kann abgeleitet werden, dass niedrigere Wasserzementwerte und damit

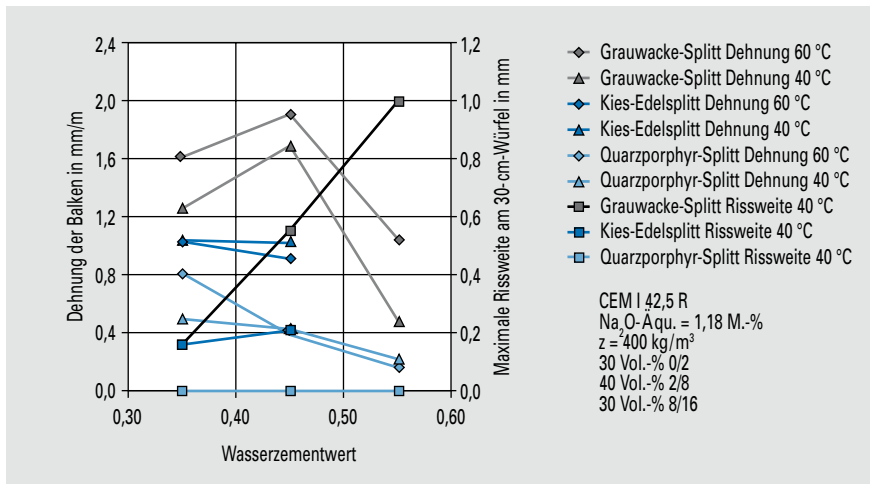


Bild V-26: Dehnung von Betonprismen (7,5 cm x 7,5 cm x 28 cm) im Alter von 140 Tagen im 60 °C-Betonversuch (60 °C), von Betonprismen (10 cm x 10 cm x 50 cm) im Alter von 9 Monaten bei Nebelkammerlagerung (40 °C) und maximale Rissweite am 30-cm-Würfel im Alter von 9 Monaten bei Nebelkammerlagerung (40 °C) für verschiedene Gesteinskörnungen

dichte Betone eine schädigende AKR in Fahrbahndecken nicht zwangsläufig verstärken. Der 30-cm-Würfel und der 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen berücksichtigen die Bedingungen von Fahrbahndeckenbeton in der Praxis besser, weil der große und kompakte Würfel anders als prismatische Prüfkörper vor Auslaugung der Alkalien geschützt ist und im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen die Einwirkung von Taumitteln simuliert wird. Anhand des letztgenannten Versuchs wird deutlich, dass bei geringen Wasserzementwerten das Eindringen der Taumittel vermindert und als Folge die Dehnung reduziert wird (Bild V-27).

Dass manche Fahrbahndecken aus den 1960er Jahren keine makroskopischen Schäden infolge einer AKR aufweisen, kann möglicherweise damit erklärt werden, dass es sich hierbei teilweise um Standstreifen handelte. Mikroskopische Untersuchungen an Dünnschliffe zeigten, dass bei diesen teilweise eine AKR stattgefunden hatte, die aber makroskopisch zu keinem Schaden führte, weil die hohe dynamische Belastung durch den Verkehr fehlte.

Einfluss Luftporen

Künstliche Luftporen beeinflussten weder in der 40 °C-Nebelkammer noch im 60 °C-Betonversuch mit bzw. ohne Alkalizufuhr von außen den Verlauf der Dehnungen von Betonen mit dichten alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen (Bild V-28).

Einfluss Fließmittel

Der Einsatz von Fließmittel kann die Dehnung von Beton erhöhen, wenn es zusätzliche Alkalien in den Beton einbringt (oh-

ne Abbildung). In der Praxis dürfte der Einfluss der Alkalien des Fließmittels aber gering sein, da die Fließmittel selten in der Höchstdosierung eingesetzt werden.

Bei Fahrbahndeckenbetonen, die im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen untersucht wurden, war die Dehnungsentwicklung bei den Betonen mit Fließmittel verzögert (Bild V-29). Die Menge an Alkalien, die durch das Fließmittel eingebracht wurde, war bei diesen Betonen gering, weil ein stark verflüssigendes Fließmittel auf PCE-Basis in geringer Dosierung eingesetzt wurde.

Einfluss Verdichtung

Die Ergebnisse im 60 °C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr zeigen, dass die Dehnungen mit zunehmender Verdichtung des Betons größer werden. Eine umgekehrte Tendenz zeigt sich bei einer Alkalizufuhr von außen. Die Natrium- und Chloridionen der Prüflösung können schneller in den schlechter verdichteten Beton eindringen und eine schädigende AKR verstärken bzw. beschleunigen (ohne Abbildung).

Schlussfolgerungen

Die durchgeführten Untersuchungen lassen den Schluss zu, dass eine zunehmende Gefügedichte des Betons nicht zwangsläufig zu einer verstärkten AKR führt. Durch die im Projekt untersuchte Veränderung der Gefügeeigenschaften von Beton konnte eine schädigende AKR nicht vermieden werden. Es war nicht möglich, durch die Wahl eines bestimmten Wasserzementwerts, durch den Verzicht auf Fließmittel bzw. einen weichen Konsistenz oder durch den Einsatz von Luftporenbildner eine schädigende AKR zu vermeiden, wenn alkali-

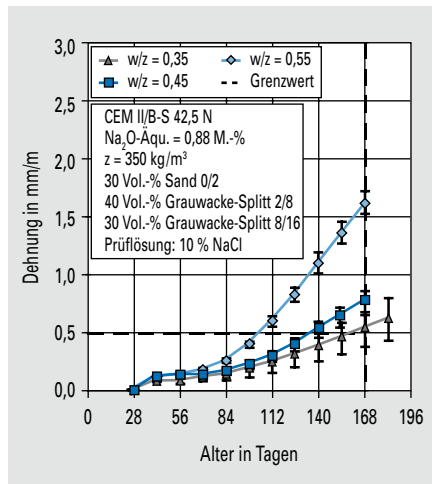


Bild V-27: Dehnung von Betonen mit unterschiedlichen Wasserzementwerten im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr durch 10%ige NaCl-Lösung

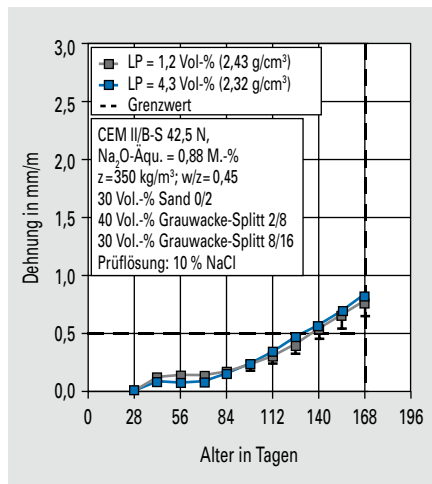


Bild V-28: Dehnung von Betonprismen mit und ohne LP-Bildner im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr durch 10%ige NaCl-Lösung

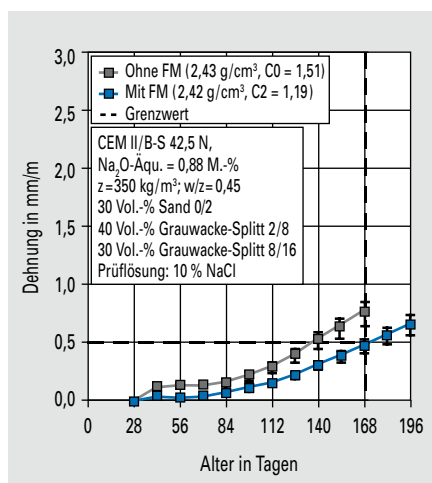


Bild V-29: Dehnung von Betonprismen mit und ohne Fließmittel im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr durch 10%ige NaCl-Lösung

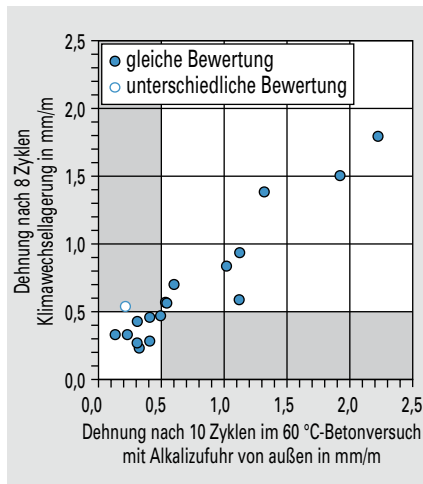


Bild V-30: Dehnung verschiedener Betone für die Feuchtigkeitsklasse WS nach 8 Zyklen der Klimawechsellaagerung mit 0,6-molarer Natriumchlorid-Lösung (Grenzwert 0,5 mm/m) und Dehnung nach 10 Zyklen im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr durch 10%ige Natriumchlorid-Lösung (Grenzwert 0,5 mm/m)

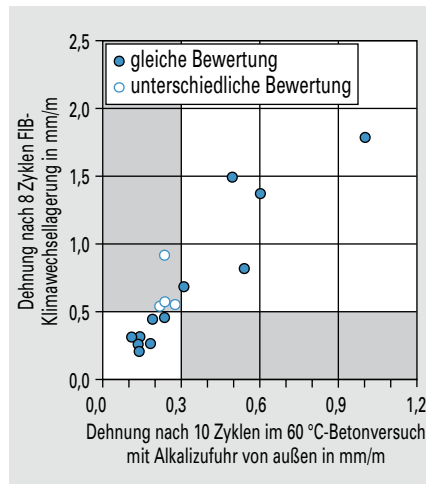


Bild V-31: Dehnung verschiedener Betone für die Feuchtigkeitsklasse WS nach 8 Zyklen der Klimawechsellaagerung mit 0,6-molarer Natriumchlorid-Lösung (Grenzwert 0,5 mm/m) und Dehnung nach 10 Zyklen im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr durch 3%ige Natriumchlorid-Lösung (Grenzwert 0,3 mm/m)

empfindliche Gesteinskörnungen eingesetzt wurden.

Darüber hinaus bestätigen die Untersuchungen, dass der Verlauf einer schädigenden AKR vom Widerstand des Betons gegenüber den von außen eindringenden Alkalien abhängt. Bei Fahrbahndeckenbetonen müssen aufgrund der Alkalizufuhr von außen immer ausreichend alkaliumempfindliche Gesteinskörnungen eingesetzt werden, um eine Schädigung infolge AKR sicher zu vermeiden.

Vergleich Performance-Prüfung FIB / VDZ

Mit AKR-Performance-Prüfungen kann die Alkaliempfindlichkeit von Betonen beurteilt werden. Die Prüfung ermöglicht eine Aussage, ob bei einem Beton in Abhängigkeit von der Exposition (Feuchtigkeitsklasse) die Gefahr besteht, dass eine AKR den Beton schädigen wird. Betone für die Feuchtigkeitsklassen WA und WS sowie für Flugbetriebsflächen werden zur Simulation der Einwirkung von Enteisungsmitteln mit einer Alkalizufuhr von außen geprüft. In Deutschland werden als Performance-Prüfverfahren der 60 °C-Betonversuch mit und ohne Alkalizufuhr von außen und das Verfahren der Klimawechsellaagerung eingesetzt.

Vergleich zwischen Performance-Prüfverfahren

In den vergangenen Jahren wurden vergleichende Untersuchungen zur Performance-Prüfung im Forschungsinstitut der Zementindustrie (60 °C-Betonversuch ohne und

mit Alkalizufuhr von außen) und an der Bauhaus-Universität Weimar (Klimawechsellaagerung) an insgesamt 18 Betonen durchgeführt. Die Betone waren wie folgt zusammengesetzt:

- w/z = 0,42, z = 370 kg/m³, LP-Gehalt: 4,5 ± 0,5 Vol.-% oder
- w/z = 0,42, z = 430 kg/m³, LP-Gehalt: ≥ 5,5 Vol.-%.

Unterschiedliche Gesteinskörnungen und Portlandzemente (Na₂O-Äquivalent zwischen 0,56 und 0,89 M.-%) wurden verwendet. Die Eignung der Betone für die Feuchtigkeitsklasse WS wurde mit dem 60 °C-Betonversuch mit einer 10%igen Natriumchloridlösung und mit der Klimawechsellaagerung mit einer 0,6 molaren Natriumchloridlösung untersucht. Die Dehnungen zum Beurteilungszeitpunkt in beiden Verfahren sind für 18 Betone in **Bild V-30** gegenübergestellt. Sechs Ergebnisse stammen aus dem FE-Vorhaben 89.214/2008/AP „AKR im Betondeckenbau“, das von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) beauftragt wurde. Bei 17 Betonen wurden vergleichbare Ergebnisse mit beiden Verfahren erzielt; nur bei einem Beton ergaben die Versuche eine unterschiedliche Bewertung (weißer Punkt).

Bild V-31 zeigt den Vergleich der Ergebnisse zwischen dem 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr und der Klimawechsellaagerung, wenn der 60 °C-Betonversuch mit einer 3%igen Natriumchloridlösung durchgeführt wird und 0,3 mm/m als Grenzwert

angesetzt würden. Der generelle Zusammenhang bliebe unverändert. 4 von 16 Betonen wurden unterschiedlich bewertet. Die Anbindung der Ergebnisse des 60 °C-Betonversuchs mit einer 3%igen Natriumchloridlösung und 0,3 mm/m als Grenzwert an Bohrkernuntersuchungen geschädigter und ungeschädigter Fahrbahndeckenbetone aus der Praxis ist gegeben. Die Anpassung der Prüfung und der Bewertungskriterien würde ggf. die Übertragbarkeit auf Praxisverhältnisse verbessern.

AKR im Betondeckenbau

Die Bundesanstalt für Straßenwesen beauftragte Untersuchungen, um zu klären, ob die Prüfungen nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie geeignet sind für den Nachweis, dass grobe Gesteinskörnungen in der Feuchtigkeitsklasse WS (Fahrbahndecken aus Beton) ausreichend sicher bezüglich der Vermeidung einer schädigenden AKR sind. Dazu wurden verschiedene grobe Gesteinskörnungen mit allen Verfahren nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie und in einem pessimistisch zusammengesetzten Fahrbahndeckenbeton (Oberbeton 0/8 mit 430 kg/m³ CEM I 42,5 N, Na₂O-Äquivalent des Zements = 0,80 M.-%) mit dem 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen untersucht.

Die Ergebnisse in **Tafel V-4** zeigen, dass drei Gesteinskörnungen den 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr bestanden und damit für die Feuchtigkeitsklasse WS geeignet sind, da keine Gefahr einer schädigenden AKR besteht. Die Gesteinskörnungen waren ebenfalls geeignet, wenn eine der folgenden Bedingungen erfüllt war:

- Alle Prüfungen nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie wurden bestanden.
- Der Mörtelschnelltest (Alternativverfahren) nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie wurde bestanden.
- Der 60 °C-Betonversuch nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie wurde bestanden.

Erfahrungen mit AKR-Performance-Prüfungen für das Prüfen und Bewerten der Alkaliempfindlichkeit von Betonen der Feuchtigkeitsklassen WF und WA werden derzeit gesammelt (vgl. Abschnitt „Erfahrungen mit Performance-Prüfverfahren“).

Alkalizufuhr von außen

Tausalze können in die Oberfläche von Bauwerksbetonen eindringen und den Mineralphasenbestand in der Zementsteinmatrix teilweise umwandeln. Die resultierende Veränderung in der chemischen Zusammensetzung der Porenlösung kann eine schädigende AKR verstärken. In dem

IGF-Vorhaben 15977 N wurden die chemisch-mineralogischen Auswirkungen von Taumitteln auf Zementstein, Mörtel und auf Fahrbahndeckenbetone untersucht.

Tausalzgehalte in 20 Jahre alten Straßendeckenbetonen

Ausgangspunkt der Untersuchungen war die Erfassung der Taumittelverteilung, ihre Bindungsform sowie die vorhandenen Reaktionsprodukte in bis zu 20 Jahre alten Fahrbahndeckenbetonen. Im ungerissenen Beton waren erhöhte Chloridgehalte bis in eine Tiefe von rd. 50 mm nachweisbar, während sich Natrium lediglich bis in eine Tiefe von rd. 20 mm angereichert hatte. Ein Teil des Chlorids wurde in aluminatischen Hydratationsprodukten eingebunden, ein Teil verblieb ebenso wie das Natrium in der Porenlösung des Betons. Durch einen rechnerischen Ansatz zum wassergesättigten Porenvolumen des Betons wurden die Salzgehalte in den Porenlösungen im oberflächennahen Bereich auf rd. 3 M.-% NaCl abgeschätzt. Im Bereich unzureichend gedichteter Fugen und in Rissen wurde das vertikale Eindringen durch eine laterale Ausbreitung mit vergleichbaren Eindringtiefen überlagert (**Bild V-32**). Fugen- und Risskanten waren somit am stärksten durch die Taumittel belastet, ohne dass es aber zu einer weiteren Anreicherung der Salzkonzentrationen gekommen wäre. Bei entsprechender Risshäufigkeit kann somit ein beträchtlicher Teil des Betonvolumens der Fahrbahndecke von den Taumitteln erreicht werden. Ein signifikanter Einfluss der Verkehrslast (Fahrstreifen oder Standspur) oder der Oberflächentextur (Besenstrich, Tuch oder Waschbeton) auf die Eindringtiefen in den ungerissenen Beton wurde nicht beobachtet.

An den Betonproben war aufgrund des dominierenden Gehalts an Gesteinskörnungen eine detaillierte Betrachtung der mineralogischen Veränderungen von Hydratationsprodukten oder der Porenlösungen nicht möglich. Daher wurden mit den in den Fahrbahndeckenbetonen ermittelten Tausalzgehalten Zementsteine verschiedener Zemente beaufschlagt. In Abhängigkeit vom primären Hydratphasenbestand, der Taumittelkonzentration sowie der Lagerungstemperatur und -dauer konnten charakteristische Umwandlungsreaktionen in den Zementsteinen beobachtet werden (**Bild V-33**). Mineralogisch interessant waren vor allem Mischkristallbildungen zwischen Friedel'schem Salz und Hydroxid-haltigen Calciumaluminathydraten, die zu geringfügigen, aber reproduzierbaren Verschiebungen der Kristallgitterparameter und damit Peakpositionen in den Röntgendiffraktogrammen führten.

Tafel V-4: Dehnungen zum Bewertungszeitpunkt für verschiedene grobe Gesteinskörnungen in Prüfungen nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie und in einem pessimal zusammengesetzten Fahrbahndeckenbeton (Oberbeton 0/8) im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen (AKR-Performance-Prüfung)

Gesteinskörnung	Dehnung zum Bewertungszeitpunkt in mm/m				
	Gesteinskörnungsprüfung nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie				AKR-Performance-Prüfverfahren
	Schnellprüfverfahren	Mörtelschnelltest ¹⁾	Nebelkammerlagerung (40 °C)	60 °C-Betonversuch	60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr (10 % NaCl)
Fraktion	5/8		5/16		5/8
Andesit I	0,34	0,53	0,32	0,08	0,13
Rhyolith I	0,70	0,89	0,38	0,15	0,22
Gabbro	0,06	0,73	0,40	0,24	0,28
Rhyolith II	1,38	2,05	0,42 ⁴⁾	0,45	0,40 ⁵⁾
Andesit II	1,40	2,30	0,43 ⁴⁾	0,36	0,53
Granodiorit II	0,79	1,74	0,64 ⁶⁾	0,89	0,57
Grenzwert	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 0,6 ²⁾	≤ 0,30 ³⁾	≤ 0,50

¹⁾ Daten der Bauhaus-Universität Weimar

²⁾ Zusätzlich maximale Rissweite < 0,2 mm

³⁾ Vorläufiger Grenzwert

□ Prüfung bestanden

■ Prüfung nicht bestanden

⁴⁾ Rissweite ≥ 0,2 mm nach 365 d

⁵⁾ Grenzwert nicht überschritten, jedoch starker Dehnungsanstieg nach 8 Zyklen, bedenklich

⁶⁾ Rissweite 0,05 mm

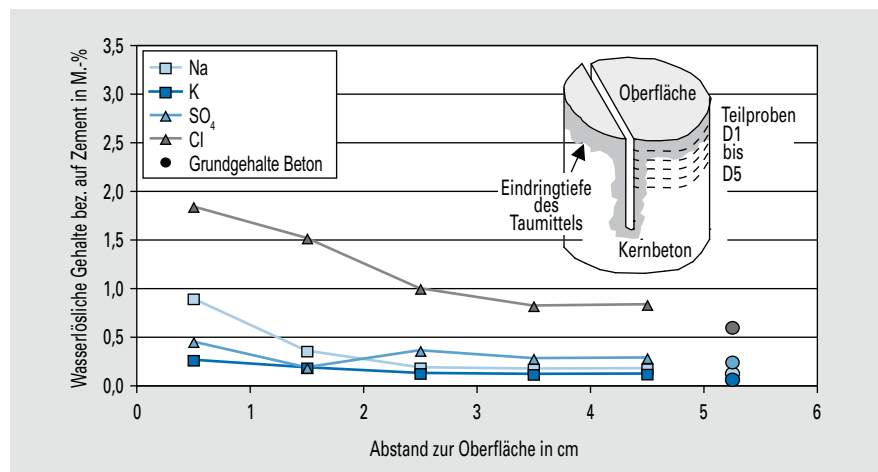


Bild V-32: Tiefenprofile der wasserlöslichen Ionengehalte eines Betonbohrkerns aus dem Fugenbereich einer Straßendecke

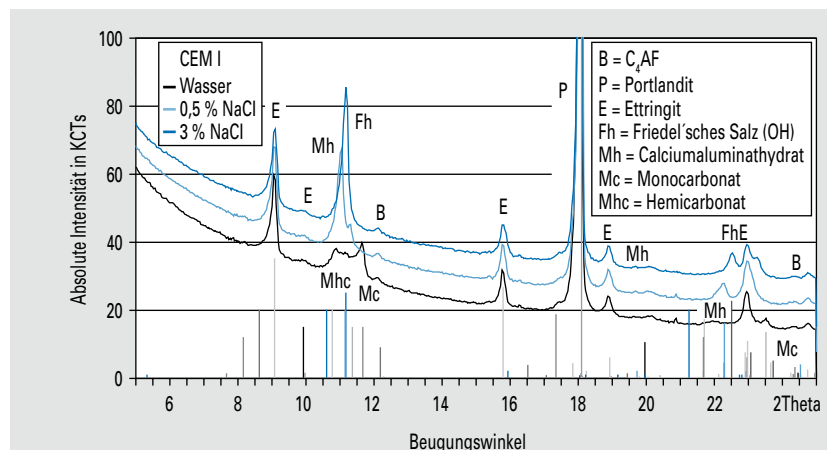


Bild V-33: Röntgendiffraktogramme von Zementstein (28 Tage hydratisierter CEM I, w/z = 0,50; weitere 28 Tage bei 20 °C in verschiedenen Prüflösungen gelagert)

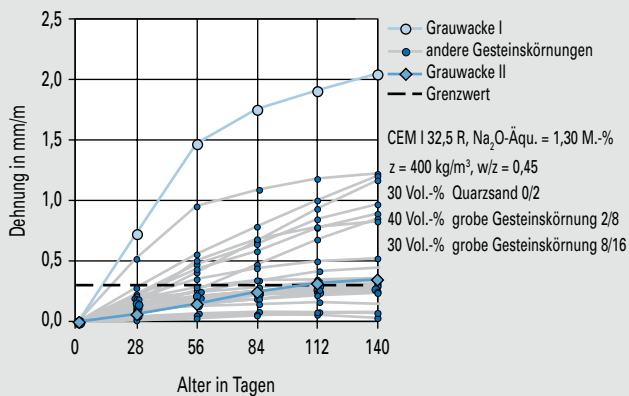


Bild V-34:
60 °C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie des DAfStb zur Prüfung der Alkaliempfindlichkeit grober Gesteinskörnungen

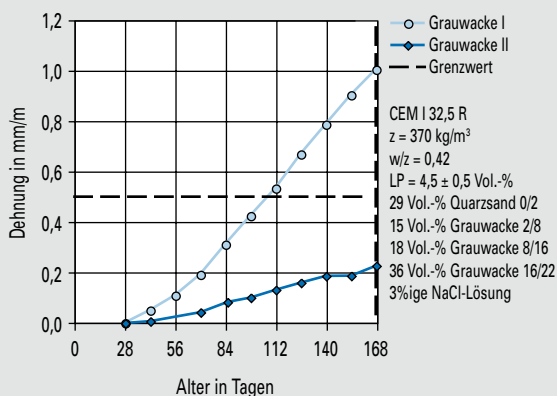


Bild V-35:
AKR-Performance-Prüfung mit dem 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen durch eine 3%ige NaCl-Lösung an zwei Betonen für die Feuchtigkeitsklasse WA mit Grauwacke-Splitt

Chlorideinbau erhöht den pH-Wert

Durch den Einbau des Chlorids in die Hydratphasen wurden OH-Ionen freigesetzt, wodurch eine geringfügige Erhöhung des pH-Werts der Porenlösung verursacht wurde. Bei höheren Lagerungstemperaturen beeinflusste die einsetzende thermische Instabilität von Ettringit durch Freisetzung von Sulfationen das Ionengleichgewicht und dadurch den pH-Wert. Diese Effekte waren von dem Na₂O-Äquivalent des eingesetzten Zements weitgehend unabhängig.

In Mörtelversuchen mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen wurde untersucht, inwieweit sich die Tausalzeinflüsse in den Zementsteinen auch auf eine schädigende AKR auswirken. Prinzipiell zeigten die Mörtel mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen bei Tausalzbeaufschlagung höhere Dehnungswerte als bei Wasserlagerung. Weitergehende Differenzierungen, z. B. nach dem Umfang der Phasenumwandlungen in den Zementsteinen oder den Lagerungseinflüssen, konnten aus den Ergebnissen der Dehnungsmessungen nicht ermittelt werden.

Maßnahmen E II-S

Bisher ist in Deutschland die Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S für dichte Gesteinskörnungen, die eine mittlere Alkaliempfindlichkeit aufweisen, nicht definiert. Mit Ausnahme von Kiesen aus Teilen Norddeutschlands (Teil 2) unterscheidet die Alkali-Richtlinie im bisherigen Teil 3 nur zwischen Gesteinskörnungen, die – festgestellt durch Prüfung – alkaliempfindlich oder alkaliunempfindlich sind (Alkaliempfindlichkeitsklassen E I-S und E III-S). Das Forschungsinstitut der Zementindustrie und die Brandenburgische Technische Universität Cottbus (BTU) untersuchen deshalb im IGF-Vorhaben 17248 BG, ob es möglich ist, eine Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S und die entsprechenden vorbeugenden Maßnahmen zur Vermeidung einer schädigenden AKR zu definieren.

Forschungsbedarf

Die Alkali-Richtlinie des DAfStb fordert bei alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen der Alkaliempfindlichkeitsklassen E II-O, E II-OF, E III-O, E III-OF und E III-S Maßnahmen in Abhängigkeit von

den Umgebungsbedingungen des Bauwerks (Feuchtigkeitsklasse) und vom Zementgehalt. Die Maßnahmen sind bisher der Austausch der Gesteinskörnung oder die Verwendung von NA-Zementen nach DIN 1164-10 mit einem niedrigen wirksamen Alkaligehalt.

Bild V-34 zeigt beispielhaft die Bandbreite der Dehnungen grober Gesteinskörnungen im 60 °C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie. Gegenwärtig wird von einem Grenzwert von 0,30 mm/m nach 140 Tagen ausgegangen, um zwischen alkaliempfindlichen und alkaliunempfindlichen Gesteinskörnungen zu unterscheiden. Bei den alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen ist die Bandbreite der Dehnungen von 0,30 bis 2,00 mm/m sehr groß. Die betontechnischen Maßnahmen, die gemäß der Alkali-Richtlinie für diese Gesteinskörnungen anzuwenden sind, sind für alle Gesteinskörnungen gleich – sowohl für Grauwacke I als auch Grauwacke II. Gemäß Alkali-Richtlinie dürfte die Grauwacke II nicht in einem Beton der Feuchtigkeitsklasse WA (feucht + Alkalizufuhr) eingesetzt werden, wenn der Zementgehalt mehr als 350 kg/m³ beträgt. Ein Beton mit dieser Grauwacke und einem Zementgehalt von 370 kg/m³ bestand aber eine AKR-Performance-Prüfung mit einer Alkalizufuhr von außen durch eine 3%ige Natriumchlorid-Lösung (NaCl). Die AKR-Performance-Prüfung zeigt, dass bei diesem Beton in der Feuchtigkeitsklasse WA keine schädigende AKR zu erwarten ist (**Bild V-35**). Grauwacke II wäre somit ggf. eine Gesteinskörnung, die einer zukünftigen Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S zuzurechnen wäre.

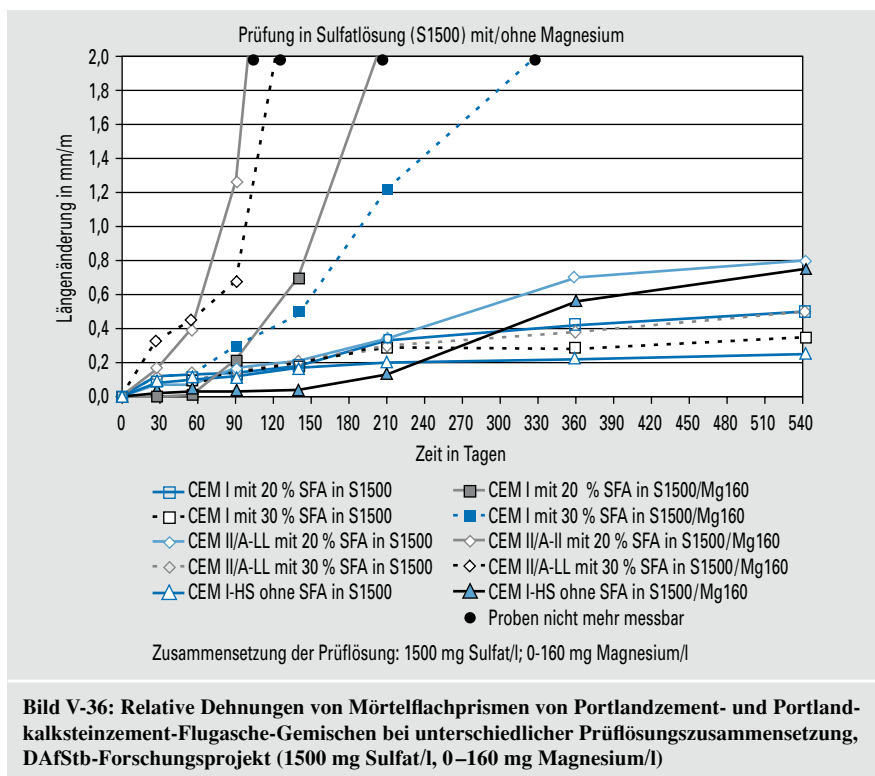
Der Beton mit der Grauwacke I bestand die AKR-Performance-Prüfung dagegen nicht. In diesem Fall ist der Austausch der Gesteinskörnung, wie ihn die Alkali-Richtlinie festlegt, berechtigt.

Sollte es möglich sein, eine Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S und die entsprechenden Maßnahmen zu definieren, würde dies die Wettbewerbsfähigkeit der Betonbauweise verbessern. Kleine und mittelständische Unternehmen, die oft nur über regional begrenzte Quellen zur Herstellung von Betonausgangsstoffen und Beton verfügen, könnten ihre stofflichen Ressourcen differenzierter nutzen, ohne die Dauerhaftigkeit des daraus hergestellten Bauwerks negativ zu beeinträchtigen.

Sulfatwiderstand ■

Sulfatwiderstand bei Magnesiumexposition

Zwischen 2007 und 2010 wurde ein Sonderforschungsvorhaben des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) mit dem Titel „Vertiefte Untersuchungen zum Sulfatwiderstand von Beton“ gemeinsam vom Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ), dem Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München und dem F. A. Finger-Institut für Baustoffe (FIB) der Universität Weimar durchgeführt. Wie im Tätigkeitsbericht 2007–2009 berichtet, wurden bei Auslagerungsversuchen des FIB an eigentlich sulfatbeständigen Betonprüfkörpern unerwartet Schäden festgestellt. Betroffen waren Prüfkörper auf Basis von Portlandkalksteinzement in Kombination mit Steinkohlenflugasche. Die parallel dazu durchgeführten Auslagerungsversuche des FIZ in sulfathaltigem Seewasser und synthetischem Boden zeigten dieses Verhalten hingegen nicht. Als Ursache für das widersprüchliche Verhalten kam allein Magnesium in Verdacht, das bei den Versuchen des FIB im angreifenden Wasser zusätzlich anwesend war. Durch anschließende Laborversuche bei allen drei Forschungsstellen bestätigte sich diese Vermutung. Wenn das angreifende Wasser neben Sulfat auch Magnesium (< 300 mg/l) enthielt, traten erhebliche Dehnungen innerhalb von einigen Monaten sowohl bei Prüfkörpern auf Basis von Gemischen aus Portlandzement und Steinkohlenflugasche als auch von Portlandkalksteinzement und Steinkohlenflugasche auf (**Bild V-36**). Die Analysen der eingesetzten Zemente und der Steinkohlenflugasche sind in **Tafel V-5** angegeben. Bei einer Erhöhung des Steinkohlenflugaschegehalts von 20 auf 30 M.-% waren die Schädigungen i. d. R. deutlich geringer (**Bild V-37**). Als vorbeugende Maßnahme ist daher eine Erhöhung des derzeit vorgeschriebenen Mindestflugaschegehalts von 20 auf 30 M.-% bei Anwendung von DIN 1045-2:2008-08, Abschnitt 5.2.5.2.2, 7. Absatz, 3. Spiegelstrich, vorzunehmen. Alle Untersuchungen (Labor- und Auslagerungsversuche) haben gezeigt, dass eine Steigerung des Flugaschegehalts im Gemisch aus Zement und Flugasche um diesen Anteil den Sulfatwiderstand von Betonen, die die HS-Eigenschaft bis 1500 mg Sulfat/l durch Zugabe von Flugasche erreichen, nachweislich verbessert. Diese Regelung gilt als Vorsichtsmaßnahme bei Sulfatangriff, und zwar unabhängig davon, ob geringe Mengen Magnesium vorhanden sind oder nicht. Der Vorteil dieser Regelung besteht darin, dass sie zum einen ein-



Tafel V-5: Eigenschaften verwendeter Zemente und Steinkohlenflugaschen

		CEM I 32,5 R	CEM II/A-LL 32,5 R	SFA A	CEM I 32,5 R	CEM II/A-LL 32,5 R	SFA X	SFA Y
spez. Oberfläche nach Blaine	cm ² /g	2755	4240	3420	2995	3580	3010	4080
CO ₂	%	1,39	6,99	0,21	1,75	3,27	0,46	0,44
Wasser	%	0,56	1,00	0,31	0,55	0,66	0,31	0,10
SiO ₂	%	21,63	17,78	56,58	20,20	20,09	48,19	47,45
Al ₂ O ₃	%	4,72	4,68	27,27	5,44	5,31	23,22	27,93
TiO ₂	%	0,26	0,23	1,07	0,27	0,31	0,94	1,21
P ₂ O ₅	%	0,22	0,19	0,20	0,11	0,10	0,03	0,7
Fe ₂ O ₃	%	1,53	2,56	4,88	2,46	2,56	12,14	9,56
Mn ₂ O ₃	%	0,04	0,10	0,04	0,06	0,06	0,13	0,05
MgO	%	0,91	1,28	1,40	1,58	1,53	2,02	1,02
CaO	%	66,34	62,11	0,92	63,66	61,72	5,14	1,45
SO ₃	%	1,99	2,58	0,13	2,92	3,30	0,90	0,27
K ₂ O	%	0,80	0,55	4,54	0,76	0,90	2,3	2,86
Na ₂ O	%	0,22	0,10	0,89	0,19	0,18	0,96	1,08
C ₃ S	%	69,8	–	–	65,9	–	–	–
C ₂ S	%	10,3	–	–	8,5	–	–	–
C ₃ A	%	10,0	–	–	10,3	–	–	–
C ₄ AF	%	4,7	–	–	7,5	–	–	–

fach zu handhaben ist und andererseits zusätzliche Festlegungen für neue Einwirkungsklassen mit (derzeit unbekannten) Grenzwerten im Bereich niedriger Magnesiumkonzentrationen in DIN 1045-2 ent-

behrlich sind. Diese Regelung wird Eingang in die Neuausgabe der DIN 1045-2 im Zusammenhang mit der Revision von EN 206 finden (Quelle: DAfStb).



Bild V-37: Mörtelfachprismen auf Basis von Portlandzement mit 20 M.-% Steinkohlenflugasche (oben) und 30 M.-% Steinkohlenflugasche (unten) nach rd. 10 Monaten Lagerung bei 8 °C in Natriumsulfatlösung (S1500) mit 160 mg Magnesium, 14 Tage Vorlagerung, DAfStb-Forschungsprojekt

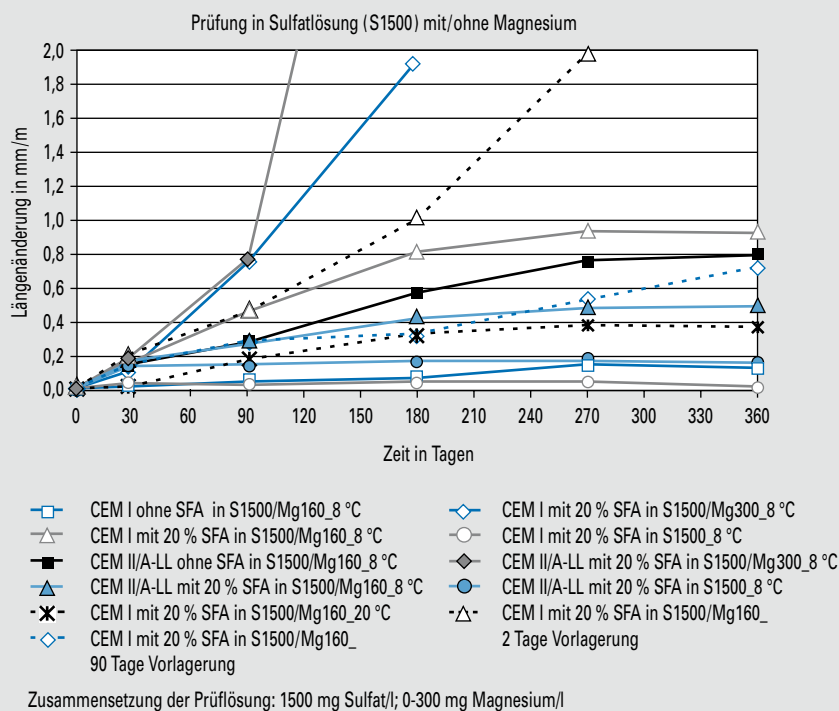


Bild V-38: Relative Dehnungen von Mörtelfachprismen von Zement-Flugasche-Gemischen bei unterschiedlicher Prüflösungszusammensetzung, Vorlagerungsdauer und Lagertemperatur, AiF-Forschungsprojekt

AiF-Forschungsprojekt

Die stofflichen Voraussetzungen und Randbedingungen, unter denen ein derartiger Sulfatangriff (mit 1500 mg Sulfat/l und ≤ 300 mg Magnesium/l) zu Schädigungen an Mörteln und Betonen führen können, wenn diese gemäß Flugascheregelung nach DIN 1045-2 mit Zement und Steinkohlenflugasche hergestellt wurden, werden seit

Ende 2010 im FIZ in einem AiF-Forschungsvorhaben (IGF-Nr. 16710 N) näher untersucht. Die Untersuchungen werden mit fünf Zementen (CEM II/A-LL, CEM II/B-S, CEM II/B-M (S-LL), CEM III/A, CEM I) und zwei Steinkohlenflugaschen sowie als Referenz mit einem CEM III/B-HS und mit einem CEM I-HS durchgeführt. Der Schwerpunkt der Unter-

suchungen liegt bei der Verwendung von Portland- und Portlandkalksteinzement. Die Analysen der hier eingesetzten Zemente und der Steinkohlenflugaschen sind ebenfalls in Tafel V-5 angegeben.

Thaumasitbildung

Starke Dehnungen und erste Schäden in Form von gefügteentfestigender Thaumasitbildung traten ähnlich wie bei den Versuchen aus dem DAfStb-Projekt nach etwa sechs Monaten auf (s. Bild V-36). Zuerst waren Prüfkörper auf Basis des Portlandkalksteinzements betroffen, die bei niedriger Temperatur (8 °C) gelagert wurden und bei denen die Magnesiumkonzentration 300 mg/l betrug. Nach rund zwölf Monaten folgten entsprechend gelagerte Prüfkörper auf Basis des Portlandzements. Bei geringerer Magnesiumkonzentration, hier 160 mg/l, waren die Prüfkörper auch nach zwölf Monaten ohne größere Dehnungen und ohne erkennbare Schäden (Bild V-38). Bei den Versuchen des DAfStb-Projekts kam es zuvor bei 40 und 80 mg Magnesium/l zu Schädigungen. Damit scheint die stoffliche Zusammensetzung der Zemente und der Steinkohlenflugaschen von großem Einfluss auf den Sulfatwiderstand im Flachprismenverfahren zu sein. Weitere Versuche haben gezeigt, dass auch die Vorlagerungsdauer und die Lagertemperatur einen entscheidenden Einfluss auf die Versuchsergebnisse ausüben. Bei verkürzter Vorlagerung (2 Tage anstatt 14 Tage) traten auch bei Prüflösungen mit 160 mg Magnesium/l schon nach wenigen Monaten hohe Dehnungen und erste Gefügeschäden auf. Bei verlängerter Vorlagerung (90 Tage anstatt 14 Tage) blieben die Prüfkörper ohne signifikante Dehnung. In Bild V-39 und Bild V-40 sind Mörtelprüfkörper nach zwölf Monaten Lagerung in Prüflösung abgebildet.

Puzzolanische Reaktion

Maßgeblich für das Auftreten von hohen Dehnungen und daraus resultierenden Schäden war aller Voraussicht nach eine unzureichende Gefügedichtheit bei den betreffenden Mörtelprüfkörpern zu Beginn des Sulfatangriffs. Mehrere Aspekte haben hierauf einen Einfluss. Entscheidende Parameter sind die langsame puzzolanische Reaktion der Flugasche in Kombination mit der kurzen Vorlagerungszeit (≤ 14 Tage), sodass der Flugascheanteil bis dahin keine bedeutenden Anteile an Hydratationsprodukten für die Gefügeverdichtung beisteuern konnte. Obwohl die Prüfkörper nach der Vorlagerung nur in Prüflösungen mit praxisnahen, also niedrigen, Sulfat- und Magnesiumlösungen gelagert wurden, kam

es dennoch zu Dehnungen und Gefügeveränderungen, allerdings nur bei 8 °C-Lagerung und nicht bei 20 °C-Lagerung. Dieses Verhalten lässt sich mit dem folgenden Reaktionsverlauf erklären: Durch die Anwesenheit vom Magnesium in der Prüflösung kam es zur Ausbildung einer oberflächen-nahen Brucitschicht (Magnesiumhydroxid). Dadurch wurde dem Gefüge Calciumhydroxid entzogen, das für die puzzolanische Anregung der Flugasche fehlte. Die Brucitschicht war jedoch nicht ausreichend, um Sulfationen daran zu hindern, in das darunter liegende Gefüge einzudringen. Bei 20 °C-Lagerung kam es daher neben der Bildung von üblichen Hydratationsprodukten auch zur Bildung von zusätzlichem Ettringit, sowohl aus der Reaktion mit Zementbestandteilen als auch mit Flugasche. Insgesamt ergab sich dadurch eine schnellere Gefügeverdichtung. Bei 8 °C-Lagerung verliefen die üblichen Hydratationsvorgänge langsamer. Das eindringende Sulfat konnte Ettringit und zusätzlich Thaumasil bilden. Hierdurch kam es zu stärkeren Dehnungen und zur oberflächlichen Gefügeentfestigung. Gemische mit 30 M.-% Steinkohlenflugasche zeigten durchweg einen höheren Sulfatwiderstand als die Gemische mit 20 M.-% Steinkohlenflugasche. Die Ursache hierfür ist vermutlich die höhere physikalische Gefügedichte. Die Flugasche wurde mit $k=0,4$ auf den Wasserelementwert angerechnet. Auch war bei diesen Proben die Brucitschicht weniger ausgeprägt als bei den anderen Proben.

HS-Zemente ohne Probleme

Obwohl die in den beiden Prüfprogrammen eingesetzten Portland- und Portlandkalksteinzemente sich kaum unterschieden, kam es zu deutlichen Unterschieden im Sulfatwiderstand der Flachprismen. Dies kann ggf. auf Unterschiede in den Eigenschaften der eingesetzten Steinkohlenflugaschen zurückgeführt werden. Eine entsprechende Auswertung und ergänzende Untersuchungen stehen aus. Aus den vorliegenden Untersuchungsergebnissen der anderen Zemente (CEM II/B-S, CEM II/B-M (S-LL) und CEM III/A) jeweils in Kombination mit 20 M.-% Steinkohlenflugasche waren auch nach zwölf Monaten Prüfung keine Indizien für einen verringerten Sulfatwiderstand erkennbar. Auch die beiden Referenzzemente CEM I-HS und CEM III/B-HS zeigten unter allen Prüfbedingungen keine Anzeichen dafür, dass die Gegenwart von derart geringen Magnesiumkonzentrationen ein zusätzliches Angriffspotenzial darstellt und es daher zu einer Verringerung des Sulfatwiderstands kommen könnte.

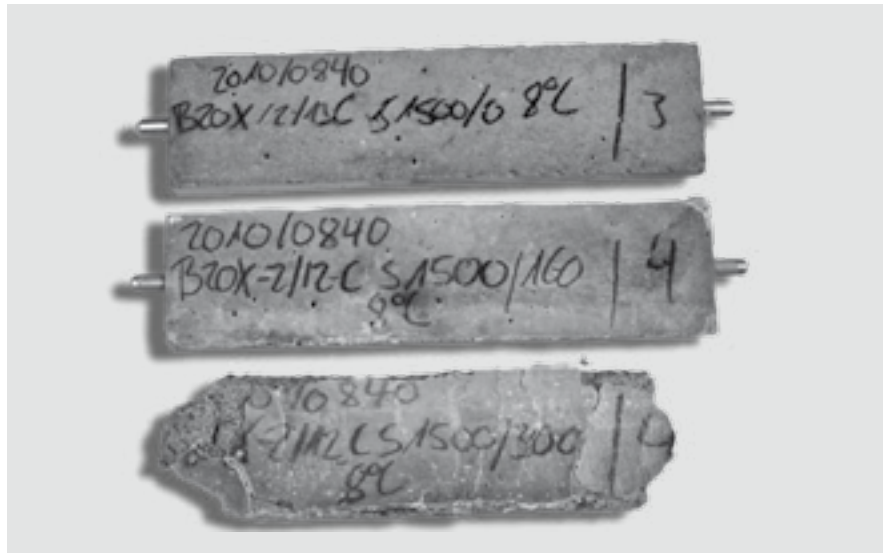


Bild V-39: Mörtelflachprismen auf Basis von Portlandkalksteinzement mit 20 % Steinkohlenflugasche, 14 Tage Vorlagerung, 12 Monate gelagert bei 8 °C in Natriumsulfatlösung (S1500) ohne Magnesium (Prisma oben), mit 160 mg Magnesium (Prisma Mitte) und 300 mg Magnesium (Prisma unten), AiF-Forschungsprojekt



Bild V-40: Mörtelflachprismen auf Basis von Portlandzement mit 20 M.-% Steinkohlenflugasche, 12 Monate gelagert bei 8 °C in Natriumsulfatlösung (S1500) mit 160 mg Magnesium nach 2 Tagen Vorlagerung (Prisma oben), 14 Tagen Vorlagerung (Prisma Mitte) und 90 Tagen Vorlagerung (Prisma unten), AiF-Forschungsprojekt

Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand ■

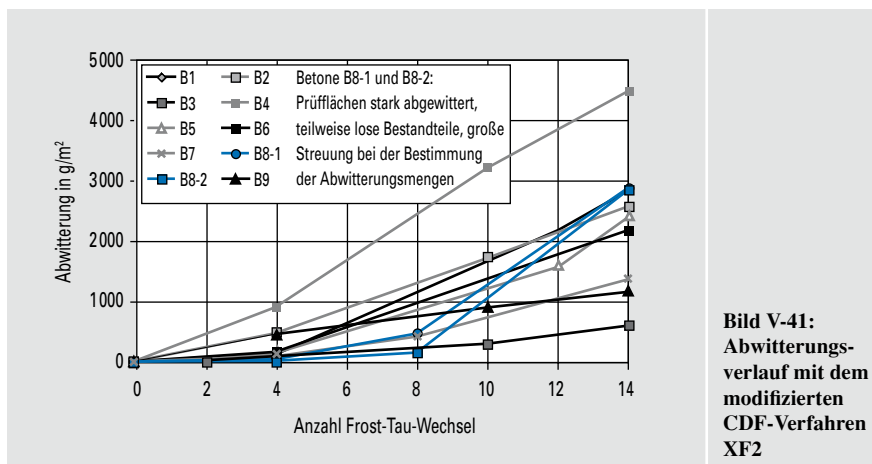
Allgemeines

Muss Beton, der bei hoher Wassersättigung Tausalzen und Frostwechseln ausgesetzt ist (= Expositionsklasse XF4), neben den deskriptiven Anforderungen der Betonnorm DIN 1045-2 einer Frost-Laborprüfung unterzogen werden, kommt in vielen Fällen das CDF-Verfahren nach DIN EN/TS 12390-9 zur Anwendung. In Bauteilen für die Expositionsklasse XF2 ist von einer deutlich geringeren Wassersättigung und damit einer geringeren Be-

anspruchung bei Frost-Tau-Wechseln auszugehen. Die Anwendung des CDF-Verfahrens würde in diesen Fällen ein unangemessen hohe Beanspruchung darstellen. Im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (bast) sollten das cbm (TU München) und die Universität Duisburg-Essen gemeinsam ein angemessenes Labor-Prüfverfahren für die Expositionsklasse XF2 entwickeln. Wesentliche Änderungen des durch die genannten Institutionen vorgeschlagenen Verfahrens sind die Anhebung der Minimaltemperatur von -20 °C auf -10 °C und die Verringerung der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel von 28 auf 14.

Tafel V-6: Zusammensetzung der untersuchten Betone

Beton	Zementbezeichnung	Zusammensetzung
B1	CEM II/B-LL 32,5 R-AZ	– $z = 320 \text{ kg/m}^3$ – $w/z = 0,50$ – FM auf Basis PCE – Gesteinskörnung Sieblinienbereich A16/B16 (Rheinsand 0/2 Quarzsand 1/2 Rheinkies 2/8 Rheinkies 8/16)
B2	CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R-AZ	
B3	CEM II/B-M (S-LL) 52,5 N-AZ	
B4	CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R-AZ	
B5	CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N-AZ	
B6	CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N-AZ	
B7	CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R-AZ	
B8-1	CEM I 32,5 R	
B8-2	CEM I 42,5 R	
B9	CEM III/A 42,5 N (LH-NA)	



Untersuchungen des Forschungsinstituts der Zementindustrie

Erste Erfahrungen mit dem so genannten CDF-Verfahren XF2 wurden im Forschungsinstitut der Zementindustrie im Jahr 2010 gesammelt. In einer Versuchsreihe mit neun nach DIN 1045-2 Tab. F2.1 zusammengesetzten XF2-Betonen ohne künstlich eingeführte Luftporen kamen zwei CEM I, ein CEM III/A, ein CEM II/B-LL und sechs CEM II/B-M (S-LL) zum Einsatz (Tafel V-6). Nach 14 Frost-Tau-Wechseln wiesen die Betone Abwitterungsmengen zwischen rd. 0,65 und rd. 4,5 kg/m² auf (Bild V-41). Die Standardabweichung erreichte innerhalb einer Prüfkörperserie (fünf Platten) bis zu 20 % des Mittelwerts.

Aufgrund der sehr großen Bandbreite der Abwitterungsmengen normgerechter XF2-Betone wurde entschieden, einen Ringversuch zusammen mit sechs Prüflabors aus dem Kreis der VDZ-Mitgliedsunternehmen durchzuführen.

Als Zemente kamen jeweils ein CEM II/B-S (B1), ein CEM II/A-LL (B2), ein CEM I (B3) bzw. ein CEM III/A (B4) zum Einsatz.

Obwohl alle teilnehmenden Labors sehr erfahren in der Prüfung mit dem CDF-Verfahren sind, unterschieden sich die ermittelten Abwitterungsmengen zum Teil erheblich. Sie lagen für Beton B1 zwischen rd. 1,1 und rd. 2,6 kg/m², für Beton B2 zwischen rd. 0,16 und rd. 2,3 kg/m², für Beton B3 zwischen rd. 0,49 und rd. 0,86 kg/m² und für Beton B4 zwischen rd. 1,4 und rd. 2,4 kg/m² (Bild V-42). Signifikante unterschiedlich hohe Abwitterungsmengen zeigten sich auch innerhalb einiger Prüfserien (fünf CDF-Platten). Hier betrug die Standardabweichung der Abwitterung zwischen rd. 8,5 und rd. 60 % des Mittelwerts.

Die gewonnenen Erfahrungen decken sich mit Erkenntnissen anderer Einrichtungen und wurden der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) zur Kenntnis gebracht. Es bleibt abzuwarten, welche Bedeutung das so genannte CDF-Verfahren XF2 erreichen wird. Nach derzeitigen Erkenntnissen des Forschungsinstituts der Zementindustrie und anderer Stellen ist eine praxisgerechte Beurteilung von Betonen, die nach den gültigen deskriptiven Regeln für die Expositions-kategorie XF2 zusammengesetzt sind, nicht in allen Fällen zu erwarten.

Frostwiderstand von Gesteinskörnungen im Beton ■

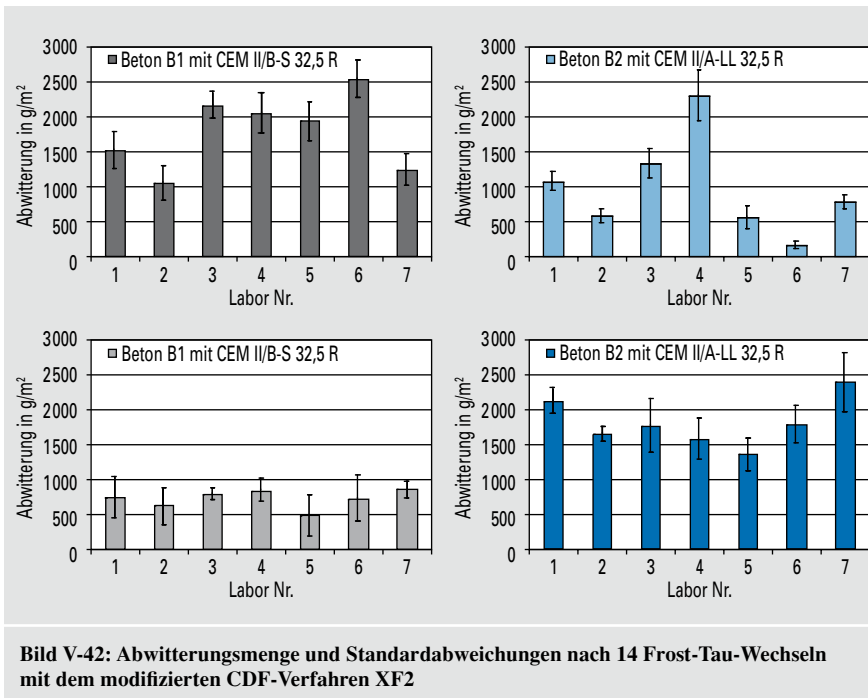
Im Rahmen des IGF-Vorhabens Nr. 15213 N untersuchten das Forschungsinstitut der Zementindustrie und die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) den Einfluss der Gesteinskörnungen auf den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Frost-Laborprüfungen.

Ausgangspunkt des Vorhabens war die Feststellung, dass die Beurteilung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands von Gesteinskörnungen mit Laborprüfungen an der Gesteinskörnung und im Beton, je nach verwendetem Prüfverfahren und Grenzwerten, zu einer unterschiedlichen Klassifizierung führen kann. Bisher kann bei keiner Form der Prüfung des Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstands an der Gesteinskörnung ausgeschlossen werden, dass die Gesteinskörnung in dieser Prüfung ein anderes Verhalten aufweist als später im Bauwerk im einbetonierten Zustand.

Für die Einschätzung und Beurteilung des Frostverhaltens von Beton in Abhängigkeit von den verwendeten Gesteinskörnungen wurden Betone mit einer gleichartigen Betonzusammensetzung verwendet, bei denen die Gesteinskörnung variiert wurde. Obwohl die untersuchten Gesteinskörnungen sich als z. T. unterschiedlich in ihren Eigenschaften erwiesen, konnten keine eindeutigen Korrelationen mit den Frisch- und Festbetoneigenschaften in Abhängigkeit von der Gesteinskörnung festgestellt werden.

Der Frostwiderstand der Betone wurde bei reiner Frost- und bei Frost-Tausalz-Beanspruchung mit verschiedenen Prüfverfahren und Prüfflächen geprüft.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass in Frost- bzw. Frost-Tausalz-Prüfungen die Abnahmekriterien in der Gesteinskörnungsprüfung nicht immer mit den Ergebnissen der Gesteinskörnungsprüfung im Beton korrelieren. Aufgrund der Einstufung einer Gesteinskörnung in eine Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstandskategorie durch eine standardmäßige Frost- bzw. Frost-Tausalz-Prüfung wurden einige der untersuchten Gesteinskörnungen für die Anwendung im Beton als nicht geeignet eingestuft. Im Betonversuch verhielten sich die Gesteine jedoch nicht immer entsprechend. Ein genereller Zusammenhang zu den Festbetonkennwerten und den Kenngrößen des Gefüges sowie zum



Feuchtgehalt war ebenfalls nicht abzuleiten. Es wurden u. a. die Druck-, Biegezug- und Spaltzugfestigkeit, die Carbonatisierungstiefe, die Luftporenkennwerte, die Wasseraufnahme und die Quecksilberporosimetrie untersucht. Die **Bilder V-43** und **V-44** zeigen beispielhaft Ergebnisse der Festbetonprüfung und der Frostprüfung an Beton mit verschiedenen Gesteinskörnungen. **Tafel V-7** zeigt die Ergebnisse der Frostprüfungen an Betonen mit variierenden Gesteinskörnungen und die Beurteilung anhand der den jeweiligen Prüfverfahren zur Zeit zugeordneten Abnahmekriterien.

Als Abnahmekriterium für Betone zum Bau von Wasserbauwerken gilt einerseits nach 28 Frost-Tau-Wechsel-Zyklen im CIF-Verfahren an geschalteten Prüfflächen 1 000 g/m² als maximale zulässige Abwitterung. Andererseits gilt als wesentliches Abnahmekriterium der Betone das Absinken des relativen dynamischen E-Modul. Diese Kriterien beziehen sich auf geschaltete Prüfflächen. Die Untersuchungen ergaben, dass ein Einfluss durch die Prüffläche (geschaltete und gesägte Flächen) im CIF-Verfahren nicht festgestellt werden konnte. Die Prüfung der Betone in Abhängigkeit von der Gesteinskörnung bei reiner Frostbeanspruchung mit dem Referenztest (Slab-Test) ergab ebenfalls keine Differenzierung.

Die im CDF-Test untersuchten Betone zeigten, dass die Abwitterungen des Betons von der Gesteinskörnung abhängig sein können. Gesteinskörnungen mit hohem FTS-Wert nach DIN EN 1397-1 in

der Gesteinskörnungsprüfung wiesen hohe Abwitterungen bei den damit hergestellten Betonen nach 28 Frost-Tau-Wechsel-Zyklen auf. Diese Ergebnisse wurden mit dem Referenzverfahren (Slab-Test) bestätigt. Hinsichtlich des Frost-Tausalz-Widerstands zeigte sich, dass trotz vergleichbarer Wasseraufnahmen die gesägten Prüfflächen deutlich höhere Oberflächenschädigungen aufwiesen als die geschalteten Prüfflächen.

Weiterhin wurde festgestellt, dass Betone, die mit nicht geeigneten Gesteinskörnungen gemäß Gesteinskörnungsfrostprüfung hergestellt wurden, durch Verringerung des Wasserzementwerts und die Schaffung zusätzlichen Expansionsraums durch Verwendung von Luftporenbildnern ein verbessertes Verhalten in der Frostlaborprüfung zeigen können.

Die zerstörungsfreien Untersuchungen mit der μ -Röntgen 3D-CT ermöglichten die Visualisierung von inneren Gefügeständen in Beton einschließlich der Visualisierung der inneren Rissbildung bei nur geringer Frostschädigung. Es wurde ferner eine Korrelation zwischen den Befunden der μ -Röntgen 3D-CT und der Ultraschallmessung aufgezeigt. Der Einfluss einer Vorschädigung von Gesteinskörnungen auf den Schädigungsverlauf konnte bei ausgewählten Betonen dargestellt werden. Es wurde beispielsweise festgestellt, dass bei Betonen mit Kies als Grobkorn häufig Schäden in der ITZ (Interfacial Transition Zone oder Kontaktzone) erkennbar waren und bei Betonen mit Festgesteinen die Schäden vom Gesteinskorn ausgehen und sich in die

Matrix fortsetzen. Der Einsatz der μ -Röntgen 3D-CT eröffnet neue Möglichkeiten bei der Analyse frostinduzierter Schädigungsprozesse in Betonen.

Zusammenfassend wurde mit dem durchgeführten Forschungsvorhaben der bisherige Erkenntnisstand zur Prüfung einer Gesteinskörnung hinsichtlich ihres Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstands im Beton erweitert. Auslagerungsversuche an Betonen, die im Rahmen dieses Vorhabens im Labor untersucht wurden, sind Bestandteil eines weiteren IGF-Forschungsvorhabens. Anhand der Ergebnisse der Auslagerungsversuche kann zukünftig die Aussagefähigkeit der Laborversuche besser beurteilt werden.

Besondere Anwendungen ■

Ultrahochfester Beton – Autogene Schwindrissneigung richtig messen

Ausgangssituation

Ultrahochfeste Betone enthalten deutlich weniger Wasser, als für eine vollständige Hydratation ihrer reaktiven Bestandteile erforderlich wäre. Je nach Zusammensetzung kann daher bereits in einem sehr frühen Stadium der Festigkeitsentwicklung die relative Luftfeuchtigkeit im Porenraum deutlich sinken. Eine solche innere Austrocknung ist mit autogenem Schwinden verbunden, das im Falle einer Dehnungsbehinderung (Zwang) zu Rissen führen kann. Risse können die Dauerhaftigkeit, die Dichtigkeit und die ästhetische Wirkung von Bauteilen aus ultrahochfestem Beton beeinträchtigen. Es ist daher von grundlegender Bedeutung, das autogene Schwinden, die Zwangsspannungen und die damit verbundene Gefahr der Rissbildung so weit wie möglich zu reduzieren.

Für die experimentelle Quantifizierung der autogenen Schwindrissneigung gibt es bislang keine einheitliche Methode. Üblicherweise wird der Quotient von Zwangsspannung und Zugfestigkeit ermittelt. Angenommen wird dabei, dass die Rissneigung umso geringer ist, je niedriger dieser Quotient ist. Bereits die Ermittlung der beiden Eingangsgrößen ist jedoch mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden.

Die beiden vorherrschenden Verfahren zur Messung von Zwangsspannungen sind die Endeinspannung prismatischer Probekörper und der Ring-Test. Beim Ring-Test handelt es sich um einen an der Innenseite mit Dehnmessstreifen versehenen Stahlring, der die Kontraktion eines Betonrings behindert. Aus der Stauchung des Stahlrings kann die Spannung im Beton berechnet werden (**Bild V-45**).

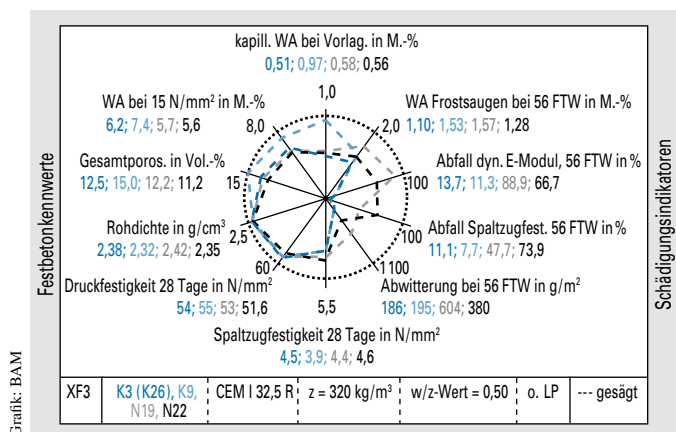


Bild V-43: Untersuchung gleichartiger XF3-Betone mit variabler Gesteinskörnung mit gesägten Prüfflächen

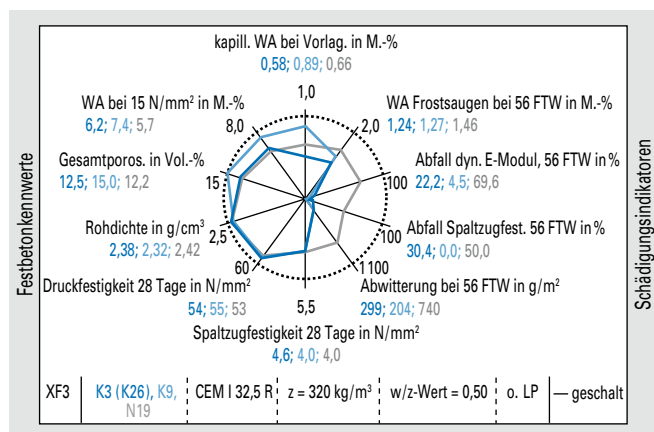


Bild V-44: Untersuchung gleichartiger XF3-Betone mit variabler Gesteinskörnung mit geschalteten Prüfflächen

Tafel V-7: Ergebnisse der Frostuntersuchungen in Abhängigkeit von der Gesteinskörnung und Bewertung anhand von Abnahmekriterien

Gesteine	Kürzel	Ergebnisse der Frostprüfung der Gesteinskörnungen (AiF 15212 und AiF 15214)			Abwitterungen in g/m²					Rel. dyn. E-Modul in %	
					CEM I 32,5 R					CEM I 32,5 R	
					Zementgehalt: 320 kg/m³					Zementgehalt: 320 kg/m³	
					Wasserzementwert: 0,50					Wasserzementwert: 0,50	
					ohne künstl. LP		Luftgehalt: ≥ 4,5 Vol.-%			ohne künstl. LP	
					Expositionsklasse: XF3		Expositionsklasse: XF4			Expositionsklasse: XF3	
		FTW-Wert	FTS-Wert	MS-Wert	Prüfverfahren					Prüfverfahren	
					CF/CIF		CDF		Referenz	CF/CIF	
Geschalte Fläche	Gesägte Fläche				Geschalte Fläche	Gesägte Fläche	Slab	Geschalte Fläche	Gesägte Fläche		
in M.-%			28 FTW	28 FTW	28 FTW	28 FTW	56 FTW	28 FTW	28 FTW		
Kiese	K26	0,3	3,5	1,8	130	98	326	362	116	93	98
	K4	0,3	2,4	7,1	n.b.	169	n.b.	522	193	n.b.	98
	K5	0,5	13,2	12,8	n.b.	228	579	829	989	n.b.	94
	K9	0,7	30,6	37,6	93	75	1030	1121	1076	99	96
Festgesteine	N11	0,6	1,2	4,6	n.b.	75	n.b.	134	87	n.b.	94
	N19	1,0	29,1	9,7	150	108	692	1781	1846	77	72
	N22	2,7	18,1	11,5	n.b.	95	n.b.	1316	400	n.b.	72

Abnahmekriterium erfüllt

FTW: DIN EN 1367-1; FTS: DIN EN 1367-1 Anh. B

Abnahmekriterium nicht erfüllt

MS: DIN EN 1367-2

n.b. nicht bestimmt

XF3: Hohe Wassersättigung ohne Taumittel

Kriterium für GK nach DIN 1045-2: F2 nach DIN EN 12620; FTW-Wert ≤ 2 M.-%

Kriterien für Beton CF/CIF: Abwitterungen (geschaltete Fläche) ≤ 1000 g/m² nach 28 FTW nach BAW; rel. dyn. E-Modul (geschaltete Fläche): ≥ 75 % nach BAW bzw. 80 % nach RILEM TC 176

XF4: Hohe Wassersättigung mit Taumittel

Kriterium für GK nach DIN 1045-2: MS18 nach DIN EN 12620; MS-Wert ≤ 18 M.-% und alternativ FTS-Wert ≤ 8 M.-%

Kriterien für Beton CDF und Referenz: Abwitterungen: CDF und geschaltete Flächen: ≤ 1500 g/m² nach 28 FTW nach BAW; Referenz: ≤ 1000 g/m² nach 56 FTW Swedish Standard SS137244 oder ≤ 500 g/m² nach 56 FTW nach DIN 1045/2, Anh. U

Bestimmte experimentelle Probleme, die sich bei der Endeinspannung ergeben, entfallen beim Ring-Test. Der relativ einfache Aufbau ermöglicht zudem eine große Anzahl von Prüfungen, was in methodischer Hinsicht von großem Vorteil ist. Nachteilig ist, dass es sich um ein passives Verfahren handelt. Dehnungen und Spannungen lassen sich nicht steuern, sodass konventionelle Kriech- und Relaxationsversuche nicht möglich sind. Allerdings kann eine

zusätzliche Spannungskomponente erzeugt werden, z. B. durch Trocknung des Betons. Auf diesem Weg kann der besonders im frühen Alter starke Einfluss der viskoelastischen Verformungskomponente auf die Zwangsspannungen untersucht werden. Zwangsspannung und Rissneigung hängen ferner vom Verlauf der Erhärtungstemperatur ab – allerdings in einer bislang kaum verstandenen Art und Weise.

Die Zugfestigkeit als Widerstandsgröße kann prinzipiell ebenfalls an endeingespannten Prismen bestimmt werden. Deutlich einfacher ist jedoch die Prüfung der Spaltzug- oder der Biegezugfestigkeit. Besonders für das sehr frühe Alter ist bislang unklar, wie sich die Ergebnisse dieser Prüfungen in zentrische Zugfestigkeiten umrechnen lassen.

Untersuchungen im Forschungsinstitut der Zementindustrie

Die Untersuchungen wurden an unbewehrten ultrahochfesten Betonen mit einem Größtkorn von 0,5 mm und bei annähernd konstanter Betontemperatur von 20 °C durchgeführt. Es wurde ein Portlandzement CEM I 52,5 R-HS/NA verwendet. Neben dem Referenzbeton (Zusammensetzung siehe **Tafel V-8**) wurden Varianten mit superabsorbierenden Polymeren (SAP), einem schwindreduzierenden Zusatzmittel (SRA) sowie einem hohen Anteil an Hüttensandmehl (HSM) untersucht.

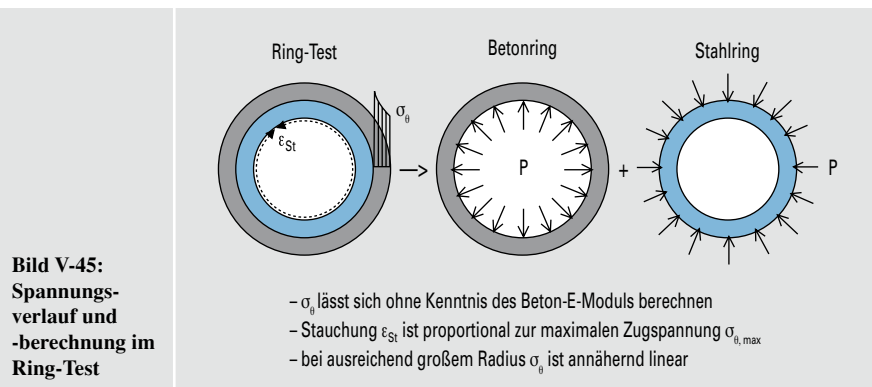
Zunächst wurde mit dem Schwindkegelverfahren das freie autogene Schwinden gemessen. Als Nullzeitpunkt wurde der Beginn von Zwangsspannungen in parallelen Ring-Tests verwendet. Besonders stark wurde das autogene Schwinden im Vergleich zum Referenzbeton (24 h: 0,7 mm/m) durch die superabsorbierenden Polymere (0,25 mm/m) und das schwindreduzierende Zusatzmittel (0,35 mm/m) verringert.

Mit dem Ring-Test wurden die Zwangsspannungen ermittelt. Ein sehr großer Teil der gemäß dem Hooke'schen Gesetz zu erwartenden Spannungen wurde durch Kriechen und Relaxation abgebaut. Die im sehr frühen Alter stark ausgeprägte Relaxationsfähigkeit war der wesentliche Grund dafür, dass es selbst bei hohem autogenen Schwinden zu keiner erkennbaren Rissbildung kam.

Zur Ermittlung des Widerstands gegen Rissbildung wurde die Spaltzugfestigkeit geprüft. Die Ergebnisse wurden mithilfe einer andernorts vorgeschlagenen nicht-linearen Funktion in Abhängigkeit vom Alter in zentrische Zugfestigkeiten umgerechnet. Die Anwendbarkeit der Umrechnungsfunktion wurde durch Ring-Tests, bei denen der Beton bis zum Bruch scharf getrocknet wurde, bestätigt.

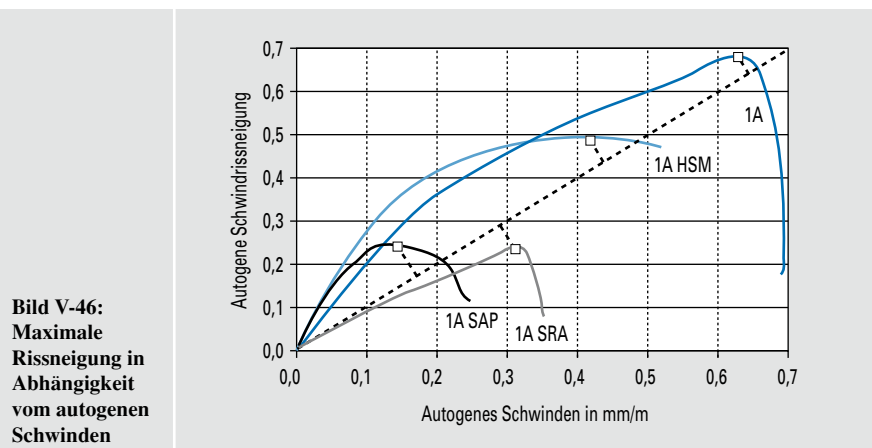
Der Referenzbeton wies eine hohe Rissneigung von bis zu etwa 0,7 auf. Durch die superabsorbierenden Polymere und das schwindreduzierende Zusatzmittel wurde die Rissneigung mehr als halbiert. Beim Beton mit hohem Anteil an Hüttensandmehl lag der Wert bei maximal etwa 0,5. Trotz des starken Einflusses viskoelastischer Verformungen ergab sich in grober Näherung ein linearer Zusammenhang zwischen dem autogenen Schwinden und der maximalen autogenen Schwindrissneigung (**Bild V-46**).

Wegen der Abhängigkeit von der Temperatur erlauben die hier bei 20 °C durchgeführten Untersuchungen allerdings keine



Tafel V-8: Zusammensetzung Referenzbeton 1A

Zement z (CEM I 52,5 R-HS/NA)	800 kg/m ³
Wasser w	168 kg/m ³
w/z	0,230
Silicastaub s	130 kg/m ³
w/(z+s)	0,198
Fließmittel	24 kg/m ³
Quarzsand (0,125–0,5 mm)	1 019 kg/m ³
Quarzmehl (0–0,125 mm)	220 kg/m ³



abschließende Bewertung der Rissneigung unter baustellentypischen Bedingungen.

Um die autogene Schwindrissneigung zukünftig als Funktion der Temperatur und des Lastniveaus empirisch modellieren zu können, wurden eine analytische Spannungslösung für nicht-isotherme Ring-Tests und ein neuer Ansatz zur Untersuchung der Resttrag- und Relaxationsfähigkeit mithilfe nicht-passiver Ring-Tests vorgeschlagen. Hierbei wird entweder durch zusätzliches Trocknungsschwinden oder durch gezielte Erwärmung von Beton- und Stahlring eine zusätzliche SpannungsKomponente erzeugt.

Das diesen Ergebnissen zugrunde liegende Forschungsprojekt wurde durch Fördermittel des Schwerpunktprogramms 1182 „Nachhaltiges Bauen mit Ultrahochfestem Beton“ der Deutschen Forschungsgemein-

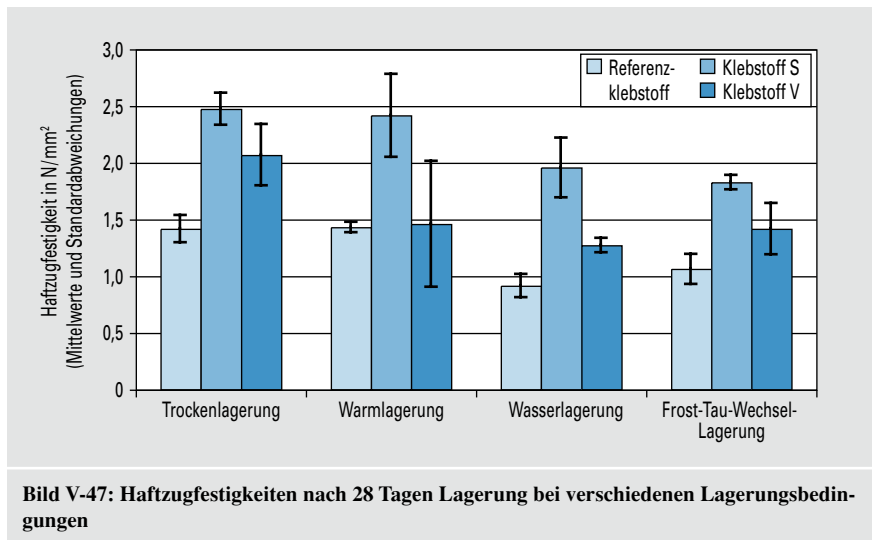
schaft ermöglicht (Projektlaufzeit Oktober 2005 bis September 2011).

Kleben von Textilbeton – Entwicklung zementbasierter Klebstoffe

Im Forschungsinstitut der Zementindustrie wurden im Rahmen eines Verbundforschungsprojekts unter Federführung des Instituts für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac) funktionelle Eigenschaften von TiO₂-modifiziertem Textilbetonen untersucht. Der Einfluss von ultrafeinen TiO₂-Partikeln auf die Schadstoffzersetzung (NO_x) und die selbstreinigende Wirkung unter UV-Lichteinfluss wird an der RWTH Aachen selbst erforscht. Ziel des im Forschungsinstitut der Zementindustrie durchgeführten Teilvorhabens ist die Untersuchung zementbasierter Klebstoffe, mit denen TiO₂-modifizierte, durch UV-Einstrahlung superhydrophile Fassadenelemente sicher verklebt werden können.

Tafel V-9: Zusammensetzung der mit gesichtetem Feinsthüttensand und Feinstflugasche modifizierten Klebstoffe S und V

Ausgangsstoff in kg/m ³ bzw. Wasserzementwert	Klebstoff S	Klebstoff V
CEM I 52,5 N	467,5	467,5
Flugasche (grob)	280,5	280,5
Flugasche (fein)	–	187,0
Hüttensand (fein)	187,0	–
Wasser	345,0	345,0
Quarzsand	765,0	765,0
Dispersionspulver	51,0	51,0
Methylcellulose	5,0	5,0
w/z	0,74	0,74
$w/z_{eq} [w/z_{eq} = w/(z + 0,4 \cdot f + s)]$	0,45	0,53

**Bild V-47: Haftzugfestigkeiten nach 28 Tagen Lagerung bei verschiedenen Lagerungsbedingungen**

Entwicklung der Klebstoffzusammensetzungen

Die Verklebung wird im Forschungsvorhaben durch die Prüfung der Haftzugfestigkeit nach DIN EN 1348 und der Haftscherfestigkeit in Anlehnung an DIN EN 12003 untersucht. Als Referenz für die Entwicklung zementbasierter Klebstoffe dient ein handelsüblicher flexibler Dünnbettmörtel nach DIN EN 12004 (Flexmörtel). Ausgehend von einer UHPC-Zusammensetzung [1] wurden die Korngrößenverteilungen der Klebstoffe optimiert. Hierzu wurden gesichteter Feinsthüttensand bzw. gesichtete Feinstflugasche sowie eine handelsübliche (grobe) Flugasche eingesetzt. Zusätzlich wurden den Klebstoffen zur Verbesserung der Adhäsionseigenschaften ein Dispergiermittel und eine Methylcellulose zugegeben. Die Zusammensetzungen der mit Feinsthüttensand (S) und mit Feinstflugasche (V) modifizierten Klebstoffe sind in **Tafel V-9** angegeben.

[1] Zilch, K.; Mühlbauer, C.: Zum Fügen von Ultra-Hochfestem Beton (UHPC) durch Verkleben: Grundlegende Untersuchungen. VDI-Berichte, 1970, S. 37–46

Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Zur Bestimmung der Haftzug- bzw. Haftscherfestigkeiten wurden Grundplatten aus TiO₂-modifizierten Feinbetonen im ibac hergestellt. Auf die Grundplatten wurden mit den zu prüfenden Klebstoffen Keramikfliesen aufgeklebt. Die Haftzugfestigkeit wurde gemäß DIN EN 1348 geprüft.

Für die Bestimmung der Haftscherfestigkeit in Anlehnung an DIN EN 12003 wurden jeweils zwei Feinbetonplatten mit den Abmessungen 100 mm x 100 mm x 10 mm mit einem Versatz von 6 mm aneinander geklebt. Alle Prüfkörper wurden in Anlehnung an DIN EN 1348 gelagert. Bei der Trockenlagerung wurden die verklebten Prüfkörper nach dem Kleben bis zum 28. Tag im Klima 20/65 gelagert. Bei der Wasserlagerung erfolgte bis zum Alter von sieben Tagen eine Trockenlagerung und anschließend bis zur Prüfung im Alter von 28 Tagen eine Lagerung unter Wasser bei 20 °C. Die Warmlagerung erfolgte nach ei-

ner 14-tägigen Trockenlagerung für 14 Tage im Heißluftschrank bei 70 °C. Vor der Prüfung wurden die Prüfkörper auf Raumtemperatur abgekühlt. Bei der Frost-Tau-Wechsel-Lagerung wurden die Prüfkörper zunächst gemäß der Wasserlagerung vorgelagert. Im Anschluss erfolgten 25 Frost-Tau-Wechsel mit jeweils einem Frost-Tau-Wechsel pro Tag. **Bild V-47** zeigt die Haftzugfestigkeiten nach Trocken-, Warm-, Wasser- und nach Frost-Tau-Wechsel-Lagerung. Der mit gesichtetem Feinsthüttensand modifizierte Klebstoff S wies bei allen Lagerungsarten um bis zu 75 % höhere Haftzugfestigkeiten auf als der Referenzklebstoff.

Bild V-48 zeigt die Haftscherfestigkeiten nach Trocken-, nach Warm- und nach Wasserlagerung. Da es bei dieser Prüfung z. T. sehr häufig (bis zu 50 % aller Prüfkörper einer Prüferie) zum Biegeversagen des Prüfkörpers anstelle des Scherversagens der Klebfuge kam, sind die gemäß DIN EN 12003 korrigierten Mittelwerte dargestellt. Ähnlich wie bei den Haftzugfestigkeiten wies der mit gesichtetem Feinsthüttensand modifizierte Kleber S unabhängig von der Lagerungsart eine höhere Festigkeit auf als der verwendete Referenzklebstoff.

Neben dem Einfluss von gesichtetem Feinsthüttensand und gesichteter Feinstflugasche auf die Klebeigenschaften von UHPC-basierten Mörteln wurde auch untersucht, welchen Einfluss eine UV-Bestrahlung der TiO₂-modifizierten Feinbetonprüfkörper auf die Klebeigenschaften der Mörtel hat. Hierzu wurden die Betonprüfkörper bis zum Erreichen superhydrophiler Eigenschaften (Kontaktwinkel eines Wassertropfens zur Oberfläche ≤ 10°) mit einer UV-Lampe bestrahlt. Direkt nach der Bestrahlung wurden auf die Betonprüfkörper Keramikfliesen aufgeklebt und die Haftzugfestigkeit nach Trockenlagerung gemäß DIN EN 1348 bestimmt. Die Haftzugfestigkeiten nach 2 und 28 Tagen Lagerung im Klima 20/65 gehen aus **Bild V-49** hervor. Durch die UV-Bestrahlung der TiO₂-modifizierten Feinbetonplatten wurde die Haftzugfestigkeit im Alter von 2 Tagen und, in Anbetracht der hohen Standardabweichung, auch im Alter von 28 Tagen nicht signifikant beeinflusst.

Bewertung der Ergebnisse

Mit zementbasierten Klebstoffen auf Basis von organisch modifizierten UHPC-Zusammensetzungen können TiO₂-modifizierte Feinbetonprüfkörper verklebt werden. In den untersuchten Lagerungsarten Trockenlagerung im Klima 20/65, Warm-

lagerung bei 70 °C, Wasserlagerung bei 20 °C sowie bei Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung war die Haftscher- und insbesondere die Haftzugfestigkeit größer als beim Referenzklebstoff. Die Haftzugfestigkeit korrelierte mit der Haftscherfestigkeit. Das Bestimmtheitsmaß R^2 betrug rd. 0,8.

In einer Versuchsreihe zum Einfluss von UV-Bestrahlung auf die Beton- und Klebeigenschaften konnten superhydrophile Oberflächen bei Verwendung TiO_2 -modifizierter Betonzusammensetzungen sicher erreicht werden. Auf die Klebeigenschaften hatten die superhydrophilen Feinbetonoberflächen bei Verwendung zementbasierter Klebstoffe auf der Basis von organisch modifizierten UHPC-Zusammensetzungen jedoch keinen signifikanten Einfluss.

Sichtbeton – Einflüsse auf die Sedimentationsstabilität

Sichtbeton erfreut sich einer großen Beliebtheit. Bauherren und Architekten verwenden die Betonoberfläche als Stilmittel und Gestaltungsform moderner Architektur. In zunehmendem Maße werden, insbesondere für repräsentative Bauwerke, glatte, porenarme und farblich einheitliche Sichtbetonoberflächen mit scharfen Kanten gefordert.

Verbundforschung „Sichtbeton“

Obwohl in der konstruktiven Bauteilbemessung, der Betontechnologie, der Trennmittelherstellung sowie der Schalungs- und Ausführungstechnik in den vergangenen Jahren große Fortschritte erzielt wurden, konnten, trotz großer Sorgfalt bei der Planung und der Ausführung von Sichtbeton, porenarme und farblich einheitliche Oberflächen nicht immer zielsicher hergestellt werden. Phänomene wie z. B. Marmorierungen, Wolkenbildungen, fleckenhafte Verfärbungen, Porenhäufung und Schleppwassereffekte können das optische Erscheinungsbild von Sichtbeton beeinträchtigen. Es fehlte an systematisch gewonnenen und wissenschaftlich begründeten Erkenntnissen, um die Ursachen und die Mechanismen dieser Phänomene zu erklären und deren Auftreten wirksam zu verringern. Deshalb wurden in einem Zusammenschluss von Fachleuten aus Wissenschaft und Praxis zwei Verbundforschungsvorhaben zum Thema „Sichtbeton“ durchgeführt. Die Verbundforschung „Sichtbeton“ wurde vom Deutschen Beton und Bautechnik-Verein E. V. (DBV) und vom Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) gemeinsam koordiniert und über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen

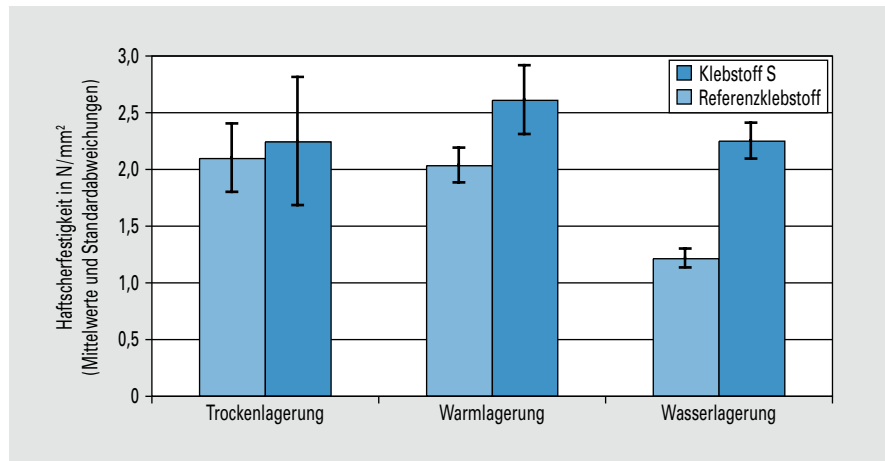


Bild V-48: Haftscherfestigkeiten nach 28 Tagen Lagerung bei verschiedenen Lagerungsbedingungen

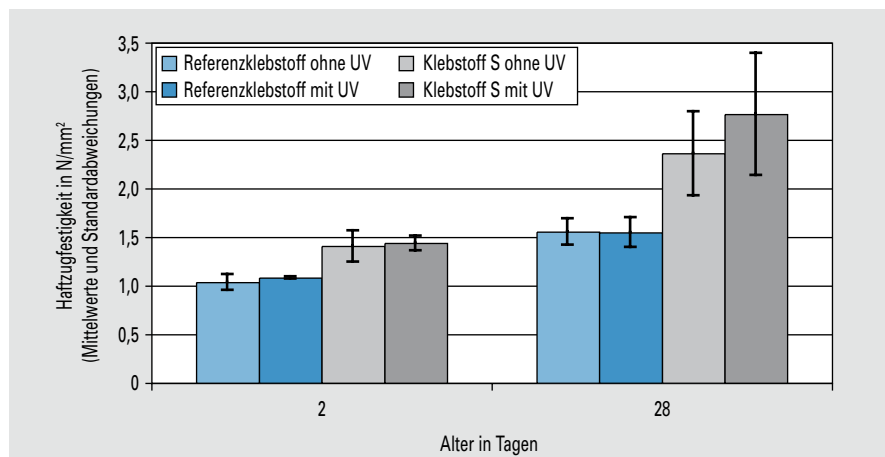


Bild V-49: Haftzugfestigkeiten mit und ohne UV-Bestrahlung der Grundplatte vor der Verklebung

„Otto von Guericke“ e. V. im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie finanziell gefördert. Die Schwerpunkte der Verbundforschung „Sichtbeton“ betrafen die Entstehung und Verringerung von Farbunterschieden in Sichtbetonoberflächen (VDZ) sowie die Integration der Erkenntnisse zu Wechselwirkungen zwischen Schalhaut, Trennmittel und Betonoberfläche in die Prozesskette bei der Herstellung von Sichtbeton (DBV).

Forschung im Forschungsinstitut der Zementindustrie

In einem über die AiF finanziell geförderten Forschungsvorhaben (IGF-Vorhaben Nr.: 15876 N) wurden im Forschungsinstitut der Zementindustrie Einflüsse von Hüttensand bzw. Kalkstein als Hauptbestandteil von Laborzementen auf rheologische Eigenschaften von Zementleim und Beton sowie die Wechselwirkungen mit Fließmit-

teln systematisch untersucht. Im Fokus der Untersuchungen stand die Verringerung von Verfärbungen in der Sichtbetonoberfläche infolge Sedimentationserscheinungen. Alle Laborzemente wurden mit der gleichen Klinker- und Sulfatträgerkomponente hergestellt.

Der positive Effekt der Substitution des Klinkers durch Hüttensand bzw. Kalkstein auf den Scherwiderstand von Zementleim wird in Bild V-50 deutlich. Im Vergleich mit dem mit Portlandzement hergestellten Leim wurde mit steigendem Anteil an Hüttensand S21 bzw. Kalkstein LL12 der Scherwiderstand des jeweiligen Leims verringert. Die Verringerung des Scherwiderstands beruhte im Wesentlichen auf einer Reduktion der Fließgrenze, bei nahezu gleichbleibender dynamischer Viskosität. Ein geringer Scherwiderstand bzw. eine geringe Fließgrenze bedeutet eine weichere Konsistenz des entsprechenden Betons. Tonige Bestandteile im eher praxisunüblichen Kalkstein LL31 bedingten einen relativ

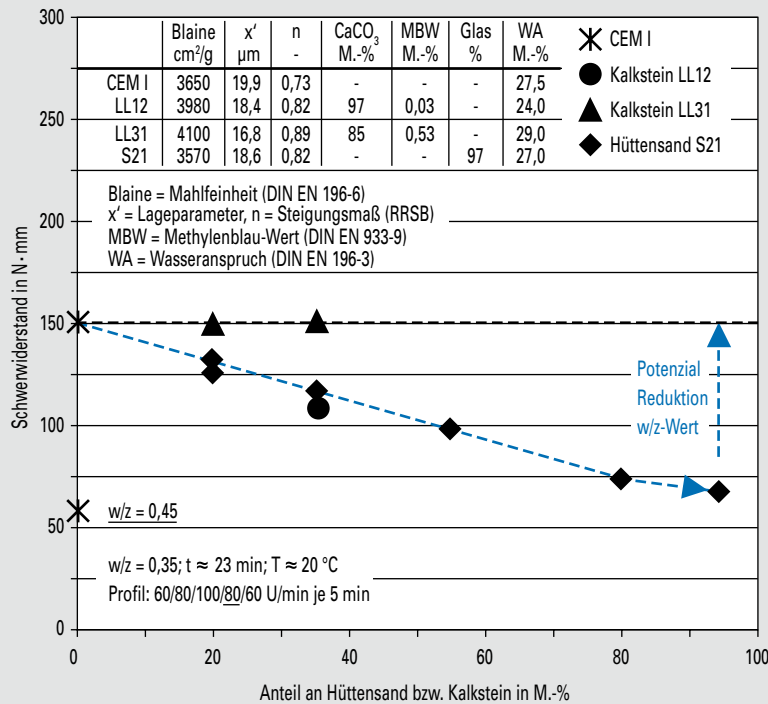


Bild V-50: Scherwiderstand von Zementleim in Abhängigkeit von der Art und dem Anteil an Hüttensand bzw. Kalkstein im Zement

großen Wasseranspruch des Zements und führten bei der Substitution des Klinkers bis zu rd. 35 M.-% zu keiner signifikanten Veränderung des Scherwiderstands des Zementleims. Bei nahezu identischer Konsistenz im Vergleich zum Beton mit Portlandzement können Betone mit Zementen mit Hüttensand bzw. Kalkstein als weiterem Hauptbestandteil neben Klinker mit geringeren Wasserzementwerten hergestellt werden. Ein geringerer Wasserzementwert erhöht bei Verwendung von Fließmittel die Stabilität des Betons gegenüber Sedimentation und verringert so das Risiko des Auftretens von Verfärbungen in Sichtbetonoberflächen deutlich. Bei gleichem Wasserzementwert ließen sich Zementleime und Betone, hergestellt mit hüttensand- bzw. kalksteinhaltigen Zementen, deutlich effektiver verflüssigen als solche mit Portlandzement. Um eine optimale Verflüssigung und Verflüssigungsdauer ohne Sedimentation bzw. Verfärbung des Sichtbetons erreichen zu können, muss die zugegebene Menge an Fließmittel immer geringer sein als die zur maximalen Verflüssigung (Sättigungspunkt) notwendige Menge. Der Sättigungspunkt sollte stets unter Verwendung der zum Einsatz kommenden Ausgangsstoffe und unter praxisnahen Bedingungen ermittelt werden. Der Sättigungspunkt kann mit dem Ausbreitversuch gemäß DIN EN 12350-5 bestimmt werden. Der Sättigungspunkt ist überschritten, wenn sich aufgrund der nicht mehr vorhandenen

Stabilität des Betons bei seiner Ausbreitung ein deutlicher Leimrand bildet und das Ausbreitmaß nicht mehr signifikant vergrößert werden kann.

Betonwaren ■

Erdfeuchte Betone

Erdfeuchte Betone werden u. a. für Pflastersteine, Platten, Bordsteine oder Betonrohre verwendet. Durch intensive Rüttel-Press-Verdichtung werden die Betone in Stahlformen kompaktiert und behalten aufgrund ihrer Grünstandfestigkeit sofort ihre Form. Bei sachgerechter Zusammensetzung erreichen die verdichteten Betone eine hohe Festigkeit und Dichtheit sowie einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand.

Modifizierter Slab-Test

Derzeit wird das Regelwerk für Betonwaren, die Normenreihe EN 1338, 1339 und 1340, überarbeitet. Der modifizierte Slab-Test steht als Verfahren zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstands, insbesondere wegen großer Wiederhol- und Vergleichsstreuung, auf dem Prüfstand. Das Verfahren unterscheidet sich im Wesentlichen vom Slab-Test nach CEN/TS 12390-9 durch die Größe und Beschaffenheit der Prüfflächen, die Prüfkörpervorlagerung, das Prüfalter und die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel. Neben der Prüfstreuung scheinen vor allem die Probenahme, die Probenbeschaffenheit und die Proben-

anzahl für die teils große Streubreite der Einzelabwitterungen verantwortlich zu sein. Deshalb wird die Erhöhung der Probekörperanzahl von derzeit drei auf mindestens fünf sowie eine repräsentative Probenahme empfohlen. Erfahrungen und Empfehlungen, die zu einer hohen Qualität von Betonwaren führen, werden gemeinsam mit dem Betonverband Straße, Landschaft, Garten e. V. (SLG) im VDZ/SLG-Gesprächskreis „Qualität von Betonwaren“ intensiv diskutiert und sollen in den Regelwerken berücksichtigt werden.

Farbtonschwankungen und Frost-Tausalz-Widerstand von Betonwaren

Über die Ursachen von Farbtonschwankungen von Betonwaren existieren kaum systematische Erkenntnisse. Deshalb wurde im o. g. Gesprächskreis ausführlich über mögliche Einflüsse aus der Betonzusammensetzung, den Zementeigenschaften und der Produktionstechnik auf die Farbtonschwankungen von Betonwaren diskutiert. Hierzu wurden von Mitgliedsunternehmen und Betonwarenherstellern systematische Untersuchungen durchgeführt.

Derzeit werden in einem von der SLG initiierten gemeinsamen Forschungsprogramm von SLG, VDZ und dem Verband Österreichischer Beton- und Fertigteilwerke (VÖB) Untersuchungen zum Einfluss von Taumitteln auf den Frost-Tausalz-Widerstand von Betonwaren durchgeführt. Neben Untersuchungen des Frost-Tausalz-Widerstands sind auch Untersuchungen zum Widerstand von Betonwaren gegenüber Kristallisation von Taumitteln bei alternierender Befeuchtung und Trocknung sowie gegenüber einem chemischen Angriff von hochkonzentrierten chloridhaltigen Taumitteln und Acetaten bei niedrigen Temperaturen vorgesehen.

Estrich ■

Bei der Herstellung von zementgebundenen Estrichen kommt heute aufgrund der stetig steigenden Anforderungen an den Umweltschutz der Verwendung von Portlandkompositzementen (CEM II) und Hochofenzementen (CEM III) eine besondere Bedeutung zu. Der VDZ ist der Frage des Zementarteinflusses auf die bautechnisch relevanten Eigenschaften von Estrichen nachgegangen. Hierzu wurden Vergleichsuntersuchungen ausgewertet, die in den Jahren zwischen 1998 und 2008 an zementgebundenen Estrichen durchgeführt wurden – mit variierenden Zementzusammensetzungen, aber ansonsten jeweils gleicher Zusammensetzung der Estriche und

identischen Herstellungs- und Prüfbedingungen. Bei den Untersuchungen wurden 40 Estrichmörtel verschiedener Zusammensetzung hergestellt. Es wurden 26 verschiedene Zemente unterschiedlicher Herkunft verwendet. Die ermittelten Eigenschaften bilden eine wesentliche Datenbasis für zementgebundene Estrichmörtel.

In der Regel kann die höhere Mahlfeinheit der CEM II- und CEM III/A-Zemente im Vergleich zum CEM I zu einem Anstieg des Wasseranspruchs der Zemente in der Normprüfung führen. Auf den Wasserbedarf des Mörtels hat dieser Effekt meist keinen Einfluss, da die Verarbeitungseigenschaften eines Mörtels maßgeblich von seiner Zusammensetzung und den Eigenschaften aller Bestandteile bestimmt werden. Dies wurde auch für Estrichmörtel bestätigt. Ebenfalls wurden andere betontechnologische Einflüsse beim Estrichmörtel bestätigt wie z. B., dass das Ansteifen, das Erstarren und Erhärten der Zementestriche durch die Temperatur und unabhängig von der Zementart nach bekannten betontechnologischen Regeln verzögert bzw. beschleunigt werden.

Abhängig von den Austrocknungsbedingungen stellt sich ein Feuchtegehalt im Estrich ein, der vom Wassergehalt, der Estrichdicke und den Umweltbedingungen abhängig ist. In der Praxis wird der Feuchtegehalt als Restfeuchte betrachtet. Der Feuchtegehalt wurde durch Ofentrocknung bei 105 °C (Darr-Methode) bzw. mithilfe der Calciumcarbid-Methode (CM-Methode) bestimmt. Die Auswertung zeigte, dass der Wasserzementwert einen maßgeblichen Einfluss auf das Austrocknen des Estrichs bei gleichbleibenden Umgebungsbedingungen hat. Bei vergleichbaren Wasserzementwerten ist die relative Luftfeuchte der Umgebung entscheidend. Die mit der CM-Methode ermittelte Restfeuchte zum gleichen Prüfalter bei jeweils identischen Prüfbedingungen liegt erwartungsgemäß niedriger als die durch Trocknung bei 105 °C ermittelte Restfeuchte. Eine eindeutig quantifizierbare Korrelation der Messergebnisse zwischen beiden Methoden konnte bei unterschiedlichen Prüfkörpern, Lagerungs- und Prüfbedingungen sowie Prüfaltern nicht abgeleitet werden. Ein systematischer Einfluss der Zementart ist nicht gegeben.

Bild V-51 zeigt als Beispiel die Restfeuchte bei Ofentrocknung (105 °C) zementgebundener Estriche. Die Ergebnisse bestätigen die grundsätzliche Eignung von Portlandzement, Portlandkomposit- und Hochofenzementen für die Herstellung von Estrichmörtel, ebenso wie in anderen Gebieten der Betonbautechnik.

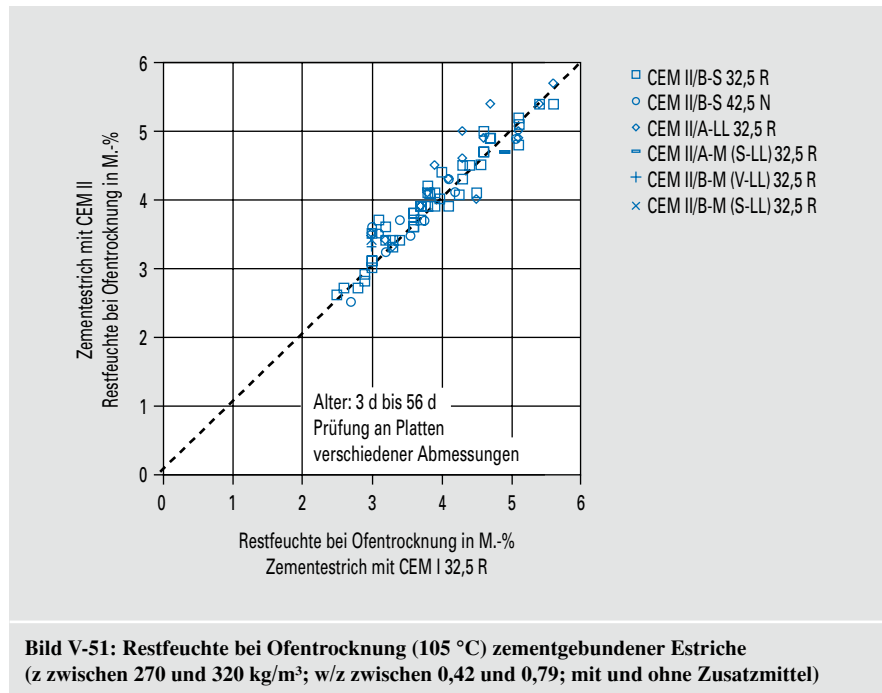


Bild V-51: Restfeuchte bei Ofentrocknung (105 °C) zementgebundener Estriche
(z zwischen 270 und 320 kg/m³; w/z zwischen 0,42 und 0,79; mit und ohne Zusatzmittel)

Die Ergebnisse der Zusammenarbeit zwischen dem VDZ und dem Bundesverband Estrich und Belag e. V. (BEB) führten im Mai 2009 zum Leitfaden zur Herstellung von Zementestrichmörteln im Innenbereich. Dieser Leitfaden sichert den Weg zur Verbreitung einer qualitativ hochwertigen Zementestrichbauweise und findet eine sehr positive Resonanz in der Praxis.

Im Rahmen der Gespräche zwischen VDZ und BEB zum technischen Erfahrungsaustausch wurde festgestellt, dass Fragen bezüglich des Austrocknungsverhaltens von Zementestrichen und geeigneten Messmethoden immer noch nicht abschließend geklärt sind. Vor diesem Hintergrund begann der BEB im Juni 2011, unter anderem auch durch finanzielle Beteiligung von VDZ-Mitgliedsunternehmen, Untersuchungen zur Austrocknung von Zementestrichen. Es werden Zementestriche mit unterschiedlichen Mischungsverhältnissen, Wasserzementwerten und Estrichdicken untersucht. Der Einfluss unterschiedlicher Zemente und Zusatzmittel wird überprüft. Die abschließende Bewertung steht noch aus. Zur Verbreiterung der Datenbasis plant der VDZ ebenfalls weitere Untersuchungen (AIF Projekt).

Industriebetonböden ■

Eine Voraussetzung zur zielsicheren Herstellung eines hochwertigen Industriebetonbodens ist eine Betonzusammensetzung, die den besonderen Ansprüchen z. B. an der Sedimentationsstabilität für diese Bauweise gerecht wird.

In dem IGF-Forschungsvorhaben Nr. 16328 N werden im Forschungsinstitut der Zementindustrie Untersuchungen durchgeführt, deren Ziel die Erarbeitung von Empfehlungen zur zielsicheren Herstellung von Betonböden ist. Neben Versuchen zum Wasserabsondern (Bluten) des Betons werden Untersuchungen zur Bestimmung des Aufbaus des Oberflächenmörtels und zur Klärung des Ansteif- und Erstarrungsverhaltens durchgeführt.

Die Erarbeitung und Auswertung einer praxisbasierten Datenbank durch eine Bestandsaufnahme auf Baustellen ergaben hinsichtlich des Einbaus und der Mischungsstabilität zunächst praxisrelevante Anhaltswerte für die Betonzusammensetzungen. Die Bauweise benötigt eine Einbaukonsistenz (Ausbreitmaß) von ca. 54 cm und eine Blutwassermenge (DBV-Eimer-Test) von etwa 3 bis 5 kg/m³. Einige Arbeiten im Vorhaben – z. B. die Baustellenbetreuung – werden vom Institut für Baustoffprüfung und Fußbodenforschung (IBF) in Troisdorf durchgeführt.

Im Forschungsinstitut der Zementindustrie wurden Betone mit variierendem Zementgehalt, Wasserzementwert, Mehlkorngelalt und Sieblinie untersucht. Es zeigte sich, dass die Verwendung von CEM II- und CEM III/A-Zementen dem Bluten im Vergleich zu CEM I-Zementen vorbeugt. Die Zunahme des Leimgehalts durch Steigerung des Zementgehalts führt zu erhöhten Blutwassermengen, die Zugabe von Quarzmehlen zu reduziertem Wasserabsondern. Eine Zunahme des Blutens konnte

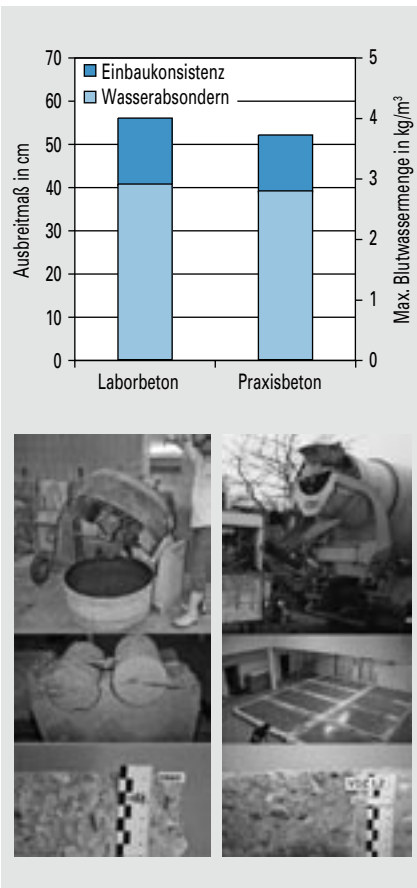


Bild V-52: Vergleich einer optimierten Betonzusammensetzung im Labor und bei praktischer Betonage im Winter (CEM II/B-S 42,5 N; $z = 340 \text{ kg/m}^3$; $w/z = 0,50$; Zusatzmittel: Kombination von Melamin- und Naphthalinsulfonaten)

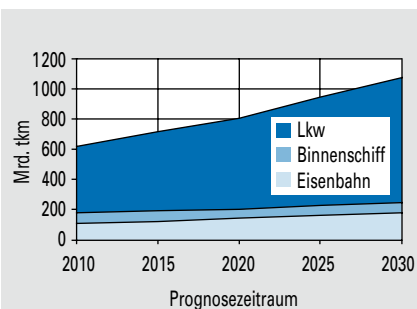


Bild V-53: Entwicklung der Güterverkehrsleistung bis 2030

bei steigendem Wasserzementwert festgestellt werden. Ebenfalls nahm das Wasserabsorbieren durch die Zunahme des Größtkorns der Gesteinskörnung zu.

Systematische Untersuchungen zu Entmischungsneigung und Stabilität wurden mit einer typischen Betonzusammensetzung für Industriebetonböden bei Variation der Zemente, Zusatzmittel und Sieblinien durchgeführt. Die Optimierung der Betonzusammensetzung zwecks Verringerung

der Sedimentations- und Entmischungsneigung unter Berücksichtigung der Einbaukonsistenz bei gleichzeitiger Einhaltung der o. g. Blutwassermenge wurde durch betontechnologische Maßnahmen wie z. B. durch Sieblinienoptimierung im Sandbereich erreicht.

Die Herstellung und Untersuchung von Betonplatten der Abmessungen $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ im Labor dienten der Vorbereitung von Baustellenversuchen.

Die visuelle Beurteilung des Betonquerschnitts zeigte in einigen Fällen Leimanreicherungen an der Oberfläche in Abhängigkeit von der verwendeten Sieblinie. Es erfolgte daraufhin eine weitere Modifizierung der Betonzusammensetzung, um möglichst alle Praxisanforderungen bis zur Pumpbarkeit des Betons zu erfüllen.

Im Rahmen einer Praxisbetonage wurde Beton nach Empfehlungen des Forschungsinstituts der Zementindustrie durch ein Transportbetonwerk zum IBF geliefert. Es wurden Versuchsflächen von $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ hergestellt. Die Einflüsse der Dicke der Fläche, der Herstellung (Misch- und Rüttelzeiten) sowie des Glättens wurden untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass die im Labor optimierte Betonzusammensetzung die Anforderungen für die Bauweise auch in der Praxis erfüllt (**Bild V-52**).

Die vollständige Auswertung aller Untersuchungsergebnisse steht derzeit aus. Am Ende der Versuchsreihe stehen praxisnahe Empfehlungen für die zielsichere Herstellung von Industriebetonböden.

Verkehrswegebau ■

Prognosen sagen einen Anstieg der Verkehrsleistung im Personen- und insbesondere im Güterverkehr voraus (**Bild V-53**). Ein Hauptanteil des Güterverkehrs wird auf die Straße entfallen und zu einer erhöhten Belastung des deutschen Fernstraßennetzes durch Schwerlastverkehr führen. Besonders wichtig sind daher dauerhafte und wirtschaftliche Bauweisen mit langer Lebensdauer und geringen Bau- und Erhaltungskosten sowie einer hohen Umweltverträglichkeit. Die Betonbauweise bietet hierfür Lösungen an. Betonstraßen zeichnen sich durch ihre hohe Dauerhaftigkeit, Verformungsstabilität und Griffigkeit sowie Lärminderung und Wirtschaftlichkeit (lange Lebensdauer und geringer Erhaltungsaufwand) aus und werden insbesondere für den Bau von Fernstraßen mit einem hohen Schwerverkehrsanteil eingesetzt. Darüber hinaus soll auch der Bereich

des kommunalen Straßenbaus weiter für die Betonbauweise erschlossen und Kombinationsbauweisen Asphalt/Beton erprobt werden.

Kombinationsbauweise Asphalt auf Beton

Gefügedichte Beton- und Asphaltdecken werden hinsichtlich der Lärminderung als gleichwertig eingestuft, leiser sind nur offenporige Asphalte. Ein Vorteil der Asphaltbauweise ist, dass die Decken schnell eingebaut und schichtenweise erneuert werden können. Nachteilig sind Spurrinnenbildung und die höheren Erhaltungsaufwendungen. Um die bisherigen Erfahrungen mit der Kombinationsbauweise zu dokumentieren, hat der VDZ-Arbeitskreis „Verkehrsbau“ einen Sachstandsbericht „Dünne Asphaltbeläge auf Betondecken (DAB)“ zusammengestellt. Diese Bauweise wird bereits seit langem im Rahmen der Straßenerhaltung genutzt und soll jetzt auch beim Neubau von Fernstraßen eingesetzt werden. Im Gegensatz zur Straßenerhaltung wird die Asphaltdeckschicht (z. B. offenporiger Asphalt oder Splittmastixasphalt) nicht auf eine alte schadhafte, sondern auf eine neue Betondecke aufgebracht. Die Betondecke übernimmt über einen langen Zeitraum die tragende Funktion, während die leicht erneuerbare Verschleißschicht die Oberflächeneigenschaften (Griffigkeit, Lärminderung) bestimmt. Die Überbauung der Betondecke mit einer offenporigen Asphaltdeckschicht ermöglicht den Einsatz von Beton auch in besonders lärmsensiblen Bereichen. Dies ist bisher mit der herkömmlichen dichten Standardbetonbauweise mit Waschbetontextur nicht möglich. Wenn die akustischen Eigenschaften oder die Griffigkeit der Asphaltdeckschicht nicht mehr den Anforderungen entsprechen, kann die Verschleißschicht abgefräst und erneuert werden. Infolge der geringen Schichtdicke des Asphaltbelags von nur rd. 3 bis 5 m, besteht nicht wie beim herkömmlichen Asphalt oberbau die Gefahr der Spurrinnenbildung. Um weitere Erfahrungen zu sammeln, ist der Bau von Erprobungsstrecken geplant. Im Bereich der BAB A5 wurde bereits eine durchlaufend bewehrte Betondecke mit einer Asphaltdeckschicht überbaut.

Beton im kommunalen Straßenbau

Im kommunalen Bereich ist die Betonbauweise in Deutschland bisher kaum vertreten. Die Erweiterung des Anwendungsbereichs kann daher große Marktpotenziale erschließen. Hierzu zählen z. B. Verkehrsflächen aus Beton im innerstädtischen Bereich, wie Kreisverkehre, Bushaltestellen

und Busspuren. Weitere Beispiele sind innerstädtische Kreuzungsbereiche, stark befahrene Einfahrtsstraßen in die Großstädte oder auch der Überbau von schadhafte Asphaltdecken mit Beton (Whitetopping). Bei stark belasteten Asphaltstraßen entstehen während Hitzeperioden in Staubereichen (z. B. vor Kreuzungen, Bushaltebuchten oder Busspuren) häufig Spurrinnen oder Verdrückungen in der Deckschicht. Instandsetzungen erfordern das Abfräsen und das Neuaufbringen der Asphaltdeckschicht. Eine Alternative ist die dauerhafte Sanierung schadhafter Asphaltbeläge mit der Whitetopping-Bauweise. Dabei wird die alte schadhafte Asphaltdecke abgefräst. Danach wird die Oberfläche gereinigt und entsprechend der Frästiefe ein hochwertiger Straßenbeton so aufgebracht, dass ein guter Verbund gewährleistet ist. Diese Technik nutzt die Tragfähigkeit der verbleibenden Asphaltschichten und stellt die Verformungsresistenz durch die Überbauung mit der dünnen Betondecke (rd. 10 cm) sicher. Um eine wilde Rissbildung zu vermeiden, werden nach dem Einbau des Betons Fugen in die Betondecke geschnitten. **Bild V-54** zeigt als Beispiel die überbauten Zu- und Abfahrtsrampen einer Autobahnanschlussstelle, deren schadhafter Asphalt oberbau mit der Whitetopping-Bauweise saniert wurde.

Bushaltebuchten oder Kreuzungsbereiche stark befahrener Straßen können auch direkt in Betonbauweise hergestellt werden. In den vergangenen Jahren wurden zunehmend z. B. Kreisverkehrsanlagen mit Betonfahrbahndecken ausgestattet. Grund ist, dass Kreisverkehrsflächen sowie Ein- und Ausfahrbereiche von Bushaltebuchten infolge des Schwerverkehrs hohen Schubverformungen ausgesetzt sind. Flächen in Asphaltbauweise können diesen Belastungen häufig nicht Stand halten, sodass eine Belagssanierung erforderlich wird. Betondecken sind hingegen verformungsstabil und garantieren eine lange Nutzungsdauer mit geringem Instandsetzungsbedarf. Damit stellen sie – auch wenn sie in der Investition etwas teurer sind als Asphaltbeläge – eine wirtschaftliche Lösung dar. Infolge der großen Schubbeanspruchung wird die Deckendicke von Betondecken in Kreisverkehrsanlagen im Vergleich zur herkömmlichen Dimensionierung vergrößert. Der Beton wird mit einem Straßenfertiger eingebaut oder im Handeinbau in eine Schalung eingebracht. Nach dem Einbau wird die Betonoberfläche mit einem Besenstrich abgezogen und nachbehandelt. Anschließend werden die Fugen geschnitten.



Bild V-54: Whitetopping-Betondecke im Bereich eines Autobahnanschlusses

Um die Umsetzung der Bauweisen zu erleichtern, werden in dem FGSV-Arbeitskreis „Stadt- und Landstraßen sowie besondere Verkehrsflächen“ entsprechende Merkblätter vorbereitet. Dabei werden Regelungen u. a. für Kreisverkehrsanlagen, Busspuren und die Whitetopping-Bauweise erarbeitet. Um Erfahrungen in allen Bereichen von der Planung bis zur Ausführung zu sammeln, sollen Pilotprojekte umgesetzt werden. Die Gerätetechnik muss jeweils den Bedingungen vor Ort angepasst werden. Die Umsetzung der Baumaßnahmen kann durch regional tätige Bauunternehmen realisiert werden. Voraussetzung hierfür sind ausreichende Erfahrungen auf dem Gebiet des Betonbaus. Nach Abschluss der Pilotprojekte sollen die Erkenntnisse dokumentiert und veröffentlicht werden.

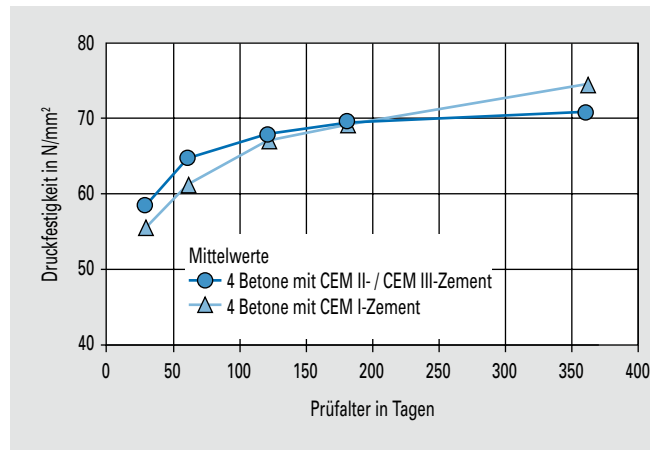
Regelwerke

Das aktuelle Regelwerk für die Betonbauweisen im Straßenbau gliedert sich in drei Teile. Die ersten beiden Teile „Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton“ (TL Beton-StB 07) und „Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton“ (ZTV Beton-StB 07) sind bereits Mitte 2008 erschienen. Als dritter Teil des Regelwerks wurde 2010 von einem Arbeitskreis der FGSV unter Leitung des Forschungsinstituts der Zementindustrie der

dritte Teil, die TP Beton-StB 10 (Technische Prüfvorschriften für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton) erarbeitet. Die TP Beton enthalten die Prüfvorschriften für alle hydraulisch gebundenen Schichten für die Baustoffe, Baustoffgemische und Einbaugemische, die Ausführung und die fertige Leistung. Gemäß TP Beton wird die Druckfestigkeit von Fahrbahndeckenbeton an Bohrkernen im Alter von 60 Tagen ermittelt. Bei einem späteren Prüfzeitpunkt wird das Prüfergebnis mit Zeitbeiwerten korrigiert. Die Zeitbeiwerte berücksichtigen die Nacherhärtung des Betons zu einem späteren Prüftermin, indem das Prüfergebnis mit dem Beiwert multipliziert wird. Sie wurden ermittelt, als standardmäßig PZ 35 F als Fahrbahndeckenzement eingesetzt wurde. Inzwischen sind zusätzliche Anforderungen an die Zementeigenschaften festgelegt worden, da auch hütensandhaltige Zemente verwendet werden. Mittlerweile werden überwiegend Zemente der Festigkeitsklasse 42,5 eingesetzt. In den TP Beton wurden daher die alten Beiwerte (**Tafel V-10**) nicht übernommen. Um die Gültigkeit zu überprüfen, wurde die zeitabhängige Druckfestigkeitsentwicklung von Betonen durch die Ruhr Universität Bochum und das Forschungsinstitut der Zementindustrie in einem Versuchsprogramm ermittelt. Mit acht aktuellen Fahrbahndeckenzementen unterschiedlicher Zementart und Festigkeitsklasse wurden acht Betone ($\rho = 350 \text{ kg/m}^3$) hergestellt und die Druckfestigkeiten im Alter von 28, 60,

Tafel V-10: Zeitbeiwerte zur Berücksichtigung des Prüfalters

Prüfalter in Tagen	Zeitbeiwerte		
	Alte Beiwerte (Standardzement PZ 35 F)	Neue Beiwerte	
		CEM I	CEM II/III
60	1,00	1,00	1,00
120	0,94	0,92	0,95
180	0,90	0,88	0,93
≥ 360	0,85	0,82	0,92

**Bild V-55: Druckfestigkeit in Abhängigkeit von dem Prüfalalter und der Zementart**

120, 180 und 360 Tagen bestimmt. Nach 28 bzw. 60 Tagen wiesen die vier Betone mit CEM II- oder CEM III-Zement im Mittel eine etwas höhere Festigkeit auf als die vier Betone mit CEM I-Zement (**Bild V-55**). Ursachen sind die feinere Mahlung der CEM II- und CEM III-Zemente zur Verringerung der Nachbehandlungsempfindlichkeit und der vergleichsweise geringe Alkaligehalt der CEM I-Zemente. Eine zügige Festigkeitsentwicklung ist vorteilhaft, da der Beton möglichst schnell die gewünschten Anforderungen erfüllt und die Verkehrsfreigabe erfolgen kann. Die im FGSV-Ausschuss „Straßenbaustoffe“ verabschiedeten aktuellen Zeitbeiwerte werden vom BMVBS eingeführt.

Regelwerke ■

Überarbeitung der europäischen Betonnorm EN 206-1

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Tätigkeitsberichts befindet sich der Entwurf der EN 206 im so genannten CEN-Enquiry. Im Rahmen dieser Umfrage sind die CEN-Mitgliedsstaaten aufgefordert anzugeben, ob der Normentwurf in der späteren Abstimmung (Formal vote) für sie zustimmungsfähig wäre bzw. was für die Zustimmung des betreffenden Landes verändert werden müsste. Daher wird hier aus einer Reihe bisher nicht veröffentlichter CEN-Dokumente zitiert werden müssen und folgerichtig kann noch nicht über die endgültige Fassung der Norm berichtet werden. Einige grundlegende Punkte, die mit großer Wahrscheinlichkeit Eingang in die Norm finden werden, werden nachfolgend beispielhaft erläutert. Basis ist der sich im Enquiry befindende Normentwurf. In die Norm integriert werden soll gemäß vorliegendem Entwurf der bisherige Teil 9 (Selbstverdichtender Beton), sodass die zusätzliche Ziffer „1“ in der Bezeichnung der EN 206 entfallen wird. Neu aufgenommen

wurden u. a. eine Tabelle zu Grundanforderungen an die Gesteinskörnung und ein Verweis auf den technischen Bericht zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Weiterhin findet eine Überarbeitung und Ergänzung der Anhänge statt. Beispielhaft seien hier genannt die Anhänge D (Zusätzliche Anforderungen an Beton für besondere Aufgaben des Grundbaus), E (Verwendung grober rezyklierter Gesteinskörnung), F (Grenzwerte der Betonzusammensetzung), G (Selbstverdichtender Beton), H (Anwendung der Methode C, „control charts“) und J (Spanische Sonderregelung für den Konformitätsnachweis).

Verwendung von Zementen

Im Abschnitt 5.1.2 der EN 206 wird die generelle Eignung von Zementen nach EN 197-1 (Normalzemente) zur Herstellung von Beton nach EN 206 festgestellt. Darüber hinaus können je nach Anwendungsanforderungen (z. B. Expositions-klassen, Bauteilabmessungen) auch die Zemente der EN 14216 (Sonderzement mit sehr niedriger Hydratationswärme) und der EN 15743 (Sulfathüttenzement) verwendet werden. EN 206 enthält keine weitergehenden konkreten, normativen Festlegungen zur Anwendung einzelner Zementarten. Gemäß 5.2.2 „Wahl des Zements“ muss der Zement aus den Zementen ausgewählt werden, deren allgemeine Eignung nachgewiesen wurde, wobei Folgendes zu berücksichtigen ist:

- Ausführung der Arbeiten
- Endverwendung des Betons
- Nachbehandlungsbedingungen (z. B. Wärmebehandlung)
- Maße des Bauwerks (Wärmeentwicklung)
- Umgebungsbedingungen, denen das Bauwerk ausgesetzt wird

- Mögliche Reaktivität der Gesteinskörnung gegenüber den Alkalien der Ausgangsstoffe

Die im informativen Anhang F enthaltenen Empfehlungen für die Betonzusammensetzung gelten nun voraussichtlich für CEM I und CEM II. Damit würde zumindest ein Teil der bereits seit vielen Jahren mit den normativen Tabellen F.3.1 bis F.3.4 der DIN 1045-2 in Deutschland gelebten Praxis der Verwendung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen – zum Teil sogar über die derzeit gültigen deutschen Regelungen hinaus – in Form einer Empfehlung auf europäischer Ebene umgesetzt. Konkret werden mit der Überarbeitung der EN 206 und der dann notwendigen Angleichung der DIN 1045-2 auch zukünftig die Anwendungsbereiche für Zemente national im Anhang F der DIN 1045-2 festgelegt.

Verwendung von Betonzusatzstoffen

Die Verwendung von Betonzusatzstoffen im Beton erfolgt in den CEN-Mitgliedsstaaten im Rahmen unterschiedlicher Prinzipien bzw. Konzepte. Die Arbeitsgruppe (TG) 5 des CEN/TC 104/SC1 hat die Prinzipien und Konzepte in einem Bericht zusammengestellt, der als CEN Technical Report (CEN/TR) veröffentlicht wird. Voraussetzung zur Anwendung der Prinzipien und Konzepte ist die Konformität des Betonzusatzstoffs mit einer der in **Tafel V-11** aufgeführten europäisch harmonisierten Stoffnormen.

k-Wert-Konzept

Das k-Wert-Konzept ermöglicht als deskriptive Regelung – d. h. ohne weitere Prüfungen neben dem Konformitätsnachweis der Betonausgangsstoffe und des Betons – die Anrechnung eines festgelegten Zusatzstoffgehalts auf den (äquivalenten) Waserzementwert bzw. den Mindestzementgehalt.

Tafel V-11: Vorschlag für das k-Wert-Konzept gemäß Entwurf der EN 206

Betonzusatzstoff	Zulässige Zementarten nach EN 197-1 (z)	k-Wert	Zusatzmenge, die auf $(w/z)_{eq}$ angerechnet werden darf
Flugasche (f) nach EN 450-1	CEM I	0,4 ¹⁾	$f/z \leq 0,33$
	CEM II/A		$f/z \leq 0,25$
Silicastaub (s) nach EN 13263-1	CEM I und CEM II/A (ohne CEM II/A-D)	2,0 ¹⁾ für $(w/z)_{eq} \leq 0,45$ 2,0 ¹⁾ für $(w/z)_{eq} > 0,45$, außer für XC und XF, in denen $k_s = 1,0$ gilt	$s/z \leq 0,11$
Hüttensandmehl (h) nach EN 15167-1	CEM I und CEM II/A	0,6 ²⁾	$h/z \leq 1,0$

¹⁾ Normativ²⁾ Empfohlener Wert

Der vorliegende Entwurf der EN 206 sieht die in Tafel V-11 angegebenen k-Werte zur Verwendung mit CEM I und CEM II/A vor.

Prinzip „Beton gleicher Leistungsfähigkeit“

In Abschnitt 5.2.5.3 der EN 206 werden aller Voraussicht nach die Prinzipien des „equivalent concrete performance concept“ (ECPC) ausgeführt. Dieses Konzept ermöglicht definierte Abweichungen von den national festgelegten deskriptiven Anforderungen an den maximalen Wasserzementwert und den Mindestzementgehalt bei gemeinsamer Verwendung eines Zements und eines Zusatzstoffs, deren Herkunft und Eigenschaften eindeutig beschrieben sind. Der Nachweis der vergleichbaren Leistungsfähigkeit erfolgt anhand von Dauerhaftigkeitsprüfungen am Beton mit der entsprechenden Materialkombination im Vergleich zu einem Referenzbeton für die entsprechende(n) Expositionsklasse(n). In den Niederlanden z. B. wurden Ablauf, Kriterien und Prüfverfahren des ECPC in der nationalen Leitlinie CUR-Empfehlung 48 festgelegt. Das ECPC wird in den Niederlanden seit etwa 15 Jahren für die Verwendung von Flugasche und Zement (CEM I oder einer parallelen Verwendung von CEM I und CEM III) und seit etwa 10 Jahren für Hüttensandmehl und Zement verwendet. Die Verfahren und Anforderungen zur Anwendung von Flugasche bzw. von Hüttensandmehl und Flugasche werden in der niederländischen Beurteilungsrichtlinie für die Zertifizierung BRL 1802 beschrieben.

Prinzip „Kombinationen Zement/Zusatzstoff gleicher Leistungsfähigkeit“

Im „equivalent performance of combinations concept“ (EPCC) wird ein Prozedere festgelegt, mit dem die Voraussetzungen geschaffen werden, eine Kombination eines bestimmten Zements (in der Regel Portlandzement CEM I) und eines be-

stimmten Zusatzstoffs so zu verwenden, wie eine vergleichbar zusammengesetzte Zementart nach EN 197-1. In Großbritannien und Irland beinhaltet das Konzept Druckfestigkeitsprüfungen an Mörteln nach EN 196-1, während in Portugal für die Kombination rechnerisch festgestellt wird, welcher Anteil der Kombination aus Zement und Zusatzstoff einer Zementart nach EN 197-1 entspricht, dessen jeweilige national festgelegte Anwendungsregel dann herangezogen wird. Damit unterscheidet sich das „equivalent performance of combinations concept“ (EPCC) grundlegend von dem „equivalent concrete performance concept“ (ECPC) dadurch, dass der Nachweis der Dauerhaftigkeit nicht durch Dauerhaftigkeitsprüfungen im konkreten Fall erbracht wird, sondern seine Begründung in den Praxiserfahrungen der Länder hat, in denen es im Rahmen der entsprechenden nationalen Anwendungsregeln (Betonzusammensetzung, Betondeckung und Nachbehandlung) sowie unter den entsprechenden klimatischen Bedingungen, der Bautradition und dem Sicherheitsbedürfnis verwendet wurde.

Verwendung von Gesteinskörnungen

Der aktuelle Normentwurf enthält, ähnlich wie im deutschen DIN-Fachbericht 100 „Beton“, in Anhang U eine Tabelle mit „Mindestanforderungen“ an die Gesteinskörnungen, die als „generell geeignet“ für Beton nach EN 206 angesehen werden. Insbesondere die Vorschläge zu den Mindestanforderungen an die Kornform „FI₄₀“ und an den Los-Angeles-Wert LA₅₀“ (prEN 206, Tabelle 15) dürften noch zu diskutieren sein. Kommentare hierzu liegen aus einigen Ländern (u. a. Deutschland) und vom Europäischen Transportbetonverband ERMCO vor. Grundsätzlich besteht aber Einvernehmen im CEN/TC 104/SC1, dass „Mindestanforderungen“ notwendig sind, da die europäische Gesteinskörnungsnorm im Zuge ihrer Weiter-

entwicklung mittlerweile Gesteinskörnungen zulässt, deren generelle Eignung zur Herstellung von Beton nach EN 206 bisher nicht nachgewiesen ist bzw. im CEN/TC 104/SC1 angezweifelt wurde. Die zuständige Arbeitsgruppe (TG) 19 soll des Weiteren Mindestanforderungen an leichte Gesteinskörnungen nach EN 13055 erarbeiten.

Konformitätsnachweis

Die zuständige Arbeitsgruppe (TG) 10 hatte ihre Arbeit mit der Maßgabe aufgenommen, dass sich die Regeln für die werkeigene Produktionskontrolle und den Konformitätsnachweis von Beton in der EN 206-1 vom Grundsatz her bewährt hätten und es daher keine Notwendigkeit gäbe, das System grundlegend zu verändern. Die folgenden Aspekte hat sich TG10 dennoch noch einmal genauer angesehen:

- Mögliche Aufnahme einer Definition „Produktionstag“ und „Produktionswoche“
- Anzahl der Prüfergebnisse und Bewertungszeitraum
- Verwendung von Kontrollkarten als Alternative zum „klassischen“ Konformitätsnachweis
- Konformitätsnachweis und Identitätsprüfung für andere Parameter als die Druckfestigkeit
- Konformitätskriterien und werkeigene Produktionskontrolle für den Fasergehalt

Der aktuelle Normentwurf enthält u. a. die in **Tafel V-12** genannten Vorschläge mit Bezug auf die zuvor genannten Aspekte.

Erwähnenswert ist weiterhin der neue informative Anhang J der EN 206, der es Spanien erlaubt, bei Methode B einen größeren Koeffizienten als 1,48 für den Konformitätsnachweis der Betondruckfestigkeit festzuschreiben. Konkret verwendet Spa-

Tafel V-12: Änderungsvorschläge zum Thema „Konformitätsnachweis“

Produktionstag	Die Definition „Produktionstag“ wird nicht aufgenommen. Es konnte keine Einigkeit auf europäischer Ebene erzielt werden. Die Festlegung erfolgt wie bisher national.
Tabelle 18 – Mindesthäufigkeit der Probenahme zur Beurteilung der Konformität	Der Begriff „Produktionswoche“ wurde ersetzt durch eine bestimmte Anzahl von Produktionstagen.
Anzahl der Prüfergebnisse und Bewertungszeitraum	EN 206-1 enthält bisher keine Begrenzung der Anzahl der Prüfergebnisse. Durch diese Unschärfe verwendet der Betonhersteller ggf. eine Standardabweichung, die nicht repräsentativ für den Nachweiszeitraum ist. Vorschlag für Werke mit geringer Prüfdichte: Anzahl Prüfergebnisse in 3 Monaten ≤ 35 : Nachweis mit $15 \leq n \leq 35$ in höchstens 12 Monaten. Vorschlag für Werke mit hoher Prüfdichte: Anzahl Prüfergebnisse in 3 Monaten > 35 : Nachweiszeitraum höchstens 3 Monate.
Einführung Methode C: Kontrollkarten	Es wird vorgeschlagen, neben den „klassischen“ Methoden des Konformitätsnachweises für die „Erstherstellung“ (Methode A) und die „Stetige Herstellung“ (Methode B) als Methode C das System so genannter „Kontrollkarten“ in die Norm zu integrieren. Die Methode C kombiniert den Konformitätsnachweis im klassischen Sinne mit einem Instrument der werkseigenen Produktionskontrolle. Sie darf nur verwendet werden, wenn die Betonherstellung einer Fremdüberwachung unterliegt oder die Anwendung der Methode ausdrücklich zwischen dem Verfasser der Festlegung und dem Betonhersteller vereinbart wurde. Für das einzuführende System muss nachgewiesen werden, dass der so genannte Durchschlupf (average outgoing quality limit/AOQL) nicht größer als 5,0 % ist. Diese Bedingung sei erfüllt, wenn die Vorgaben und Anforderungen des neu eingeführten Anhang H eingehalten werden.
Konformitätsnachweis und Identitätsprüfung für andere Parameter als die Druckfestigkeit	Für die Konsistenz einschließlich des selbstverdichtenden Betons, den Luftgehalt und den Nachweis von Fasergehalt/-verteilung werden Konformitätskriterien bzw. Kriterien für die Abnahmeprüfung auf der Basis von Einzelwerten in Form von Grenzwerten bezogen auf den festgelegten Wert bzw. die Klasse am Ort der Übergabe vorgeschlagen (Tabelle 23 und Abschnitte B.4 und B.5)

Tafel V-13: Vergleich der Anwendungsregeln für Zemente im Rahmen nationaler Anhänge zur europäischen Betonnorm EN 206-1 am Beispiel eines Betons für die Expositionsklasse XF1

Land	max (w/z) _{eq}	min z in kg/m ³	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			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

(x) mit Einschränkungen

nicht erwähnt

○ nicht erlaubt

nien weiterhin den früher auch in Deutschland vorgeschriebenen Wert von 1,64. Der Grund dafür ist, dass gemäß einer notifizierten spanischen Regel das Abnehmerisiko niemals mehr als 50 % betragen darf.

Druckfestigkeit vs. Dauerhaftigkeit

Im Zuge der vorbereitenden Arbeiten für die Revision der EN 206 wurde die Frage diskutiert, inwiefern die Druckfestigkeit des Zements, der Kombination Zement/Zusatzstoff oder des Betons stellvertretend

(engl.: „as a proxy criterion“) eine Aussage über Dauerhaftigkeitseigenschaften zulässt. Die Frage resultiert aus der gelebten Praxis, im Rahmen deskriptiver Anwendungsregeln (z.B. Anwendung der Zemente nach DIN EN 197-1 gemäß den Tabellen F.3.2 bis F.3.4 in DIN 1045-2 oder der Verwendung von Kombinationen nach BS8500-2 gemäß der Anwendungsregeln in BS8500-1), auf der Basis festigkeitsbezogener Konformitätsnachweise für Zement, Kombination und Beton auf eine

konkrete Überprüfung der Dauerhaftigkeit zu verzichten. Dies erscheint in beiden Fällen gerechtfertigt aufgrund der umfangreichen Praxiserfahrungen der betreffenden Länder, auf deren Grundlage im Rahmen der jeweiligen nationalen Anwendungsregeln (Betonzusammensetzung, Betondeckung und Nachbehandlung) sowie unter den entsprechenden klimatischen Bedingungen, der Bautradition und dem Sicherheitsbedürfnis die Stoffe erfolgreich eingesetzt werden.

Nicht ohne weitere Überprüfung der Dauerhaftigkeitseigenschaften zulässig ist diese Vorgehensweise bei neuen Stoffen. Auch eine unmittelbare Übertragung der Anwendungsregeln eines Landes auf die Verhältnisse in einem anderen Land verbietet sich aus den zuvor genannten Gründen. Anschaulich darstellen lässt sich dies im Vergleich von Anwendungsregeln für Zemente verschiedener Länder am Beispiel von Außenbauteilbetonen (**Tafel V-13**).

So lässt Italien auf der Basis national verfügbarer und bewährter Rohstoffe in Außenbauteilen die Verwendung einer deutlich größeren Bandbreite von Zementen zu als z. B. Deutschland. Der Vergleich der betontechnischen Randbedingungen zeigt, dass die Voraussetzungen hierfür in Italien (max. $w/z = 0,50$) aber auch andere sind als in Deutschland (max. $w/z = 0,60$).

Ein anderes Beispiel ist die Anwendung hüttensandhaltiger Zemente mit hohem Sulfatwiderstand nach DIN 1164-10 (HS) bzw. EN 197-1 (SR) im Vergleich zu Kombinationen aus Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff und Portlandzement [2]: Im Gegensatz zu den deutschen Erfahrungen mit hüttensandhaltigen Hochofenzementen (HS- bzw. SR-Zement mit einem Hüttensandgehalt ≥ 66 M.-%) belegen verschiedene Untersuchungen aus Großbritannien und den USA, dass die gemeinsame Verwendung von Hüttensandmehl (Anteil > 65 M.-%) und Portlandzement keinesfalls immer einen höheren Sulfatwiderstand des Betons bewirkt als die alleinige Verwendung eines Portlandzements. Als Beispiel werden in [2] Ergebnisse aus Langzeituntersuchungen von D. C. Stark [3] über einen Zeitraum von bis zu 16 Jahren sowohl unter Labor- als auch unter Freilandbedingungen gezeigt. Die Betonprüfkörper wurden einem hohem Sulfatangriff und einem Befeuchtungs-Trocknungs-Zyklus ausgesetzt. **Bild V-56** zeigt in grafischer Darstellung das Abwitterungsverhalten von Prüfkörpern auf Basis von Portlandzement bzw. von Gemischen aus Portlandzement und Hüttensandmehl. Die hüttensandmehlhaltigen Prüfkörper zeigten stärkere Abwitterungen als die Prüfkörper auf Basis von Portlandzement (= „ohne HSM“) [3].

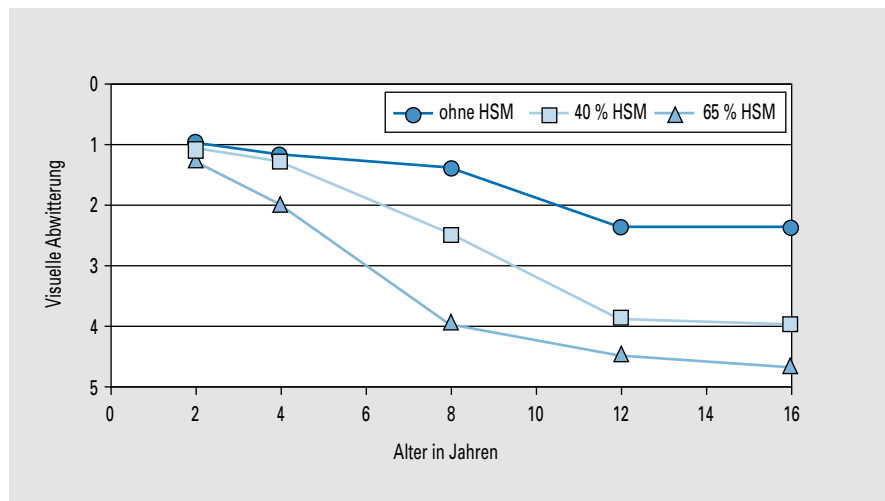


Bild V-56: Visuelle Abwitterungsraten von Betonprüfkörpern auf Basis von Portlandzement („ohne HSM“-) und Portlandzement/Hüttensandmehl(h)-Gemischen [$w/z = 0,37-0,39$, $(z+h) = 390 \text{ kg/m}^3$, Hüttensandmehlanteil 40 bzw. 65 M.-%], Sulfatkonzentration der Lagerlösung 65 000 ppm [2, 3]

Bericht aus CEN / TC 104

„Beton und zugehörige Produkte“

Seit dem Jahr 2003 engagiert sich das Forschungsinstitut der Zementindustrie in der Leitung des CEN/TC 104 „Beton und zugehörige Produkte“. Im Jahre 2009 folgte Dr. Christoph Müller Professor Gerd Thiele in dieser Funktion nach. CEN/TC 104 ist das oberste und damit maßgebende europäische Normungsgremium rund um den Baustoff Beton. Neben der europäischen Betonnorm EN 206 – deren Überarbeitung im CEN/TC 104/SC1 unter Leitung von Professor Rolf Breitenbücher (Ruhr-Universität Bochum) vorbereitet wird – werden in den Arbeitsgruppen und Komitees des CEN/TC 104 z. B. die Normen für Betonzusatzstoffe, Betonzusatzmittel, die Bauausführung und die Betoninstandsetzung bearbeitet. Nachfolgend werden ergänzend zu den Erläuterungen im Bezug auf die Revision der EN 206 einige Beispiele aus der Arbeit des CEN/TC 104 vorgestellt:

Arbeitsgruppe (WG) 4: „Flugasche“

Die Revision der EN 450-1 „Flugasche für Beton“ war bei einer schriftlichen Vorabfrage zum Start des „formal vote“ zunächst abgelehnt worden. Viele CEN-Mitglieder hatten nicht geantwortet und diese Stimmen wurden als Enthaltung gewertet. Frankreich und Italien hatten den Start des „formal vote“ abgelehnt, da Ihre Kommentare hinsichtlich der Streichung der unteren Klassengrenzen für den Glühverlust (LOI) „nicht ausreichend berücksichtigt worden seien“. Die Streichung der unteren Klassengrenzen für den Glühverlust (LOI) war aus Sicht der WG4 erforderlich, um die Herstellung einer Kategorie B (2 bis

7 M.-% Glühverlust) bei Beibehaltung der statistischen Bewertung (wie bei Zement, Silicastaub und Hüttensandmehl) zu ermöglichen. Durch die Ablehnung aus Frankreich und Italien und die geringe Beteiligung anderer Länder wurde die erforderliche Zustimmung zum Start des „formal vote“ bei der gewichteten Abstimmung verfehlt. Die Angelegenheit wurde im CEN/TC 104 erneut diskutiert, jedoch ohne einvernehmliches Ergebnis. Der Normentwurf wurde nicht geändert, zum „formal vote“ verabschiedet und schließlich mehrheitlich bestätigt. In der formellen Abstimmung stimmte eine gewichtete Mehrheit von 74,05 % für die Norm – 71 % waren notwendig. EN 450-2 mit den Konformitätsregeln bleibt unverändert.

Griechenland hatte einen Antrag gestellt, kalkreiche Flugaschen (z. B. Braunkohlenflugasche) zu normen. Die Aschen weichen in ihrer Zusammensetzung von den Vorgaben der EN 450-1 ab. CEN/TC 104 sah bei seiner Sitzung im November 2011 keinen zwingenden Bedarf zur Normung dieser Flugaschen. Die europäische Flugascheorganisation ECOBA wurde gebeten, zunächst weitere Informationen zur Anwendung der kalkreichen Flugaschen zur Verfügung zu stellen.

WG 15: „Hüttensandmehl“

Bei der Abfrage zur turnusgemäßen Revision der EN 15167 „Hüttensandmehl“ schlugen mehrere Länder die Überarbeitung der Norm mit dem Ziel vor, eine Klassifizierung für Hüttensandmehl zu erarbeiten. Die Niederlande schlugen zudem erneut vor, normativ die Möglichkeit zu eröffnen, dem Hüttensandmehl einen Sulfatträger zuzugeben. Eine Klassenbildung

[2] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff – Sachstand und Szenarien für die Anwendung in Deutschland. Schriftenreihe des DAfStb, Heft 569, Berlin 2007

[3] Stark, D.: Performance of concrete in sulphate environments. Portland Cement Association, ISBN 0-89312-221-1, 2002

kann von Bedeutung sein, wenn Hüttensandmehl unter dem k-Wert-Konzept angewendet werden soll. Derzeit liegt der empfohlene k-Wert ohne weitere über EN 15267 hinausgehende Anforderungen an das Hüttensandmehl bei $k = 0,60$. Aussagekräftige Daten, mit denen eine Korrelation zwischen Klassen für Hüttensandmehl und darauf aufbauend einem variablen k-Wert zur Abbildung einer entsprechenden Leistungsfähigkeit im Beton gelingen kann, wurden bisher nicht vorgelegt. Die Zugabe eines Sulfatträgers kommt im Rahmen der Normung eines Betonzusatzstoffs aus grundsätzlichen Erwägungen nicht in Frage. EN 15167 wurde daher in der jetzigen Form bestätigt. Zur Klärung des tatsächlichen Revisionsbedarfs sind die CEN/TC 104-Mitglieder aufgerufen, die genauen Anforderungen an mögliche Klassen zu formulieren und den Bezug zur Leistungsfähigkeit des Betons aufzuzeigen.

Standing Committee (SC) 8: „Schutz und Instandsetzung von Betonbauwerken“

Deutschland hatte mehrfach Bedenken gegen die Normenreihe EN 1504 vorgebracht. Die Normen entsprechen aus deutscher Sicht nicht vollumfänglich dem Mandat. Es fehlen einige Anforderungen. Die deutschen Bedenken wurden in CEN/TC 104 im November 2011 erneut vorgetragen. Eine Lösung konnte nicht gefunden werden. Auf der Grundlage einer Resolution des CEN/TC 104 hat daraufhin unter Leitung des Forschungsinstituts der Zementindustrie im März 2012 ein Gespräch zwischen Vertretern von CEN/TC 104 (dt. Delegation) und CEN/TC 104/SC 8 stattgefunden, bei dem noch einmal die deutsche Position zur EN 1504-3 erläutert wurde. Die Mehrheit der bei dem Treffen anwesenden SC 8-Vertreter war der Meinung, dass die von Deutschland geforderten zusätzlichen Leistungsmerkmale nicht in die europäische Norm aufgenommen werden sollten. Diese zusätzlichen Leistungsmerkmale stammen überwiegend aus Regelwerken des Verkehrswegebau (ZTV-ING, ZTV-W, ZTV-SIB, ZTV-RISS etc.), die neben technischen Inhalten auch vertragliche Anforderungen enthalten und damit trotz Notifizierung nach Auffassung der Mehrheit der bei dem Treffen anwesenden SC 8-Vertreter nicht als Regelungen verstanden werden, die in der Normungsarbeit des CEN beachtet werden müssen. Bei dem Treffen verständigte man sich darauf, dass das Mandat M/128 und der zugehörige Geschäftsplan um weitere Leistungsmerkmale ergänzt werden sollten, damit die Anforderungen aus dem Verkehrswegebau, der im Mandat als Anwendungsbereich für die

EN 1504-3 genannt ist, vollständig Berücksichtigung finden. Deutschland wurde aufgefordert, die Mandatanpassung über das SCC (Standing Committee on Construction) zu erwirken. Der NABau wird hierzu mit Unterstützung durch den NA 005-07-06 AA „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“ als Spiegelgremium zu CEN/TC 104/SC 8 gebeten, an die deutschen Mitglieder im Ständigen Ausschuss für das Bauwesen (BMVBS, DIBt) ein entsprechendes Schreiben mit einer stichhaltigen Begründung zu richten.

Joint working group (JWG) des CEN/TC 250/SC 2 „Eurocodes“ und des CEN/TC 104/SC 1 „Beton“

Die gemeinsame Arbeitsgruppe des CEN/TC 250/SC 2 „Eurocodes“ und des CEN/TC 104/SC 1 „Beton“ arbeitet an einem neuen Ansatz zur zukünftigen Normung der Einwirkungen aus den Umwelteinflüssen und den korrespondierenden Widerständen des Betons. Bisher werden die Einwirkungsklassen (Expositionsklassen) normativ beschrieben, die Widerstände (Mindestanforderungen an die Betonzusammensetzung) sind informativ und ihre abschließende Regelung erfolgt in den nationalen Anhängen. Angedacht ist nunmehr eine Kombination aus Einwirkungsklassen (Expositionsklassen) und Widerstandsklassen (z. B. unterschiedliche Carbonatisierungstiefen nach 50 oder 100 Jahren). Voraussetzung dafür sind entsprechende Prüfverfahren, die derzeit auf Europäischer Ebene noch nicht für alle Eigenschaften zur Verfügung stehen. Alternativ könnte eine Tabelle mit Vorgaben für die Zusammensetzung des Betons (w/z-Werte, Zementarten, Zusatzstoffe) entwickelt werden. Die Grenzwerte würden dann als „deemed to satisfy = als erfüllt angesehen“ deklariert. Im Hinblick auf eine weitere Harmonisierung der technischen Regeln erscheint dieser Ansatz erfolgversprechend.

Richtlinien des DAfStb

DAfStb-Richtlinie „Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen“

Die Neufassung des Wasserhaushaltsgesetzes, die geplante Novellierung der Bundesverordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (VAUwS) sowie Anpassungen an den Eurocode 2 machten es erforderlich, die DAfStb-Richtlinie „Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen“ aus dem Jahr 2004 zu überarbeiten. Dabei wurde in Ergänzung zu der durch die zuvor genannten Gründe motivierten Überarbeitung auch die Liste der verwendbaren Zementarten ergänzt (CEM II/A-M (T-LL) bzw. ange-

passt (Bezugnahme der aktuell gültigen Zementnormen) und die Anforderung an die Mindestdruckfestigkeitsklasse bei FDE-Beton wurde gestrichen, um die Anwendung von Leichtbeton zu ermöglichen. Schließlich wurde eine detaillierte Verfahrensbeschreibung zur Anwendung der Thermografie für die Bestimmung der Eindringtiefen wassergefährdender Stoffe in ungerissenen Beton (insbesondere für n-Hexan und Di-Chlormethan) aufgenommen. Die Richtlinie wird derzeit in Brüssel notifiziert.

DAfStb-Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“

In DIN EN 206-9 sind seit 2010 ergänzende Regeln für selbstverdichtenden Beton festgeschrieben. Diese decken nicht die in Deutschland vorhandene Regelungs-dichte ab. Deshalb wurde die Richtlinie „Selbstverdichtender Beton (SVB)“ überarbeitet und ändert bzw. ergänzt die DIN EN 1992-1-1 in Verbindung mit DIN EN 1992-1-1/NA, DIN EN 206-1 sowie DIN EN 206-9 in Verbindung mit DIN 1045-2 und DIN EN 13670 in Verbindung mit DIN 1045-3 und fügt teilweise neue Absätze hinzu. Neu in die Richtlinie wurde u. a. das Verfahren zur Prüfung des Kegelsetzfließmaßes und der Kegelauflaufzeit mittels Auslaufkegel aufgenommen. Die Veröffentlichung erfolgt voraussichtlich Anfang 2013.

DAfStb-Richtlinie „Qualität der Bewehrung – Ergänzende Festlegungen zur Weiterverarbeitung von Betonstahl und zum Einbau der Bewehrung“

Die Notifizierung und Drucklegung erfolgte im Jahr 2011.

DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“

Die Erstausgabe der DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“ wurde mit Datum März 2010 veröffentlicht. Die Umstellung der DIN 1045-1 auf den EC 2-1-1 und die damit verbundene Veröffentlichung der DIN EN 1992-1-1 und des Nationalen Anhangs (DIN EN 1992-1-1/NA) zu Beginn des Jahres 2011 hat zur Konsequenz, dass die Richtlinie „Stahlfaserbeton“ redaktionell überarbeitet werden musste. Durch Änderungen beim Durchstanznachweis im EC 2-1-1 gegenüber DIN 1045-1:2008 mussten auch die entsprechenden Passagen im Teil 1 der Richtlinie „Stahlfaserbeton“ überarbeitet werden. Eine Diskussion ergab sich auch noch einmal darüber, in welchem Verantwortungsbereich der Auswaschversuch nach Anhang M der Richtlinie zur Bestimmung des Stahlfasergehalts durchgeführt werden muss. Die Sicherstel-

lung der Fasermenge und der homogenen Faserverteilung im Fahrmischer liegt im Verantwortungsbereich des Herstellers. Daher wurde die Prüfung im Teil 2 der Richtlinie in die Erstprüfung und die werkseigene Produktionskontrolle des Herstellers integriert. Teil 3 der Richtlinie wurde daraufhin dahingehend geändert, dass die Annahmeprüfung (Auswaschversuch oder alternativ Biegebalkenprüfung) nur noch in begründeten Zweifelsfällen durchgeführt werden muss, wobei die bisherigen Annahmekriterien erhalten bleiben. Es wurde schließlich beschlossen, den auf den EC 2-1-1 umgestellten Entwurf der DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“ noch einmal in ein Einspruchverfahren zu geben. Hintergrund für diese Entscheidung war u. a. die geplante Herausgabe einer Berichtigung und eines Entwurfs einer A1-Änderung zu DIN EN 1992-1-1/NA, die gegebenenfalls Auswirkungen auf die Richtlinie „Stahlfaserbeton“ haben können. Weiterhin wurde inzwischen die neue DIN 1045-3 als nationale Anwendungsregel zur DIN EN 13670 veröffentlicht. Daher wurde der Teil 3 der Richtlinie ohne inhaltlichen Eingriff auf die neuen Ausführungsnormen DIN EN 13670:2011-03 und DIN 1045-3:2012-03 umgestellt.

DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkali-reaktion im Beton (Alkali-Richtlinie)“

Die Alkali-Richtlinie wird derzeit in Arbeitskreisen des Unterausschusses „Alkali-reaktion im Beton“ des DAfStb überarbeitet. Ziel ist eine vollständige Neustrukturierung der Richtlinie (Auflösung der bisherigen drei Teile der Richtlinie) und Anpassung an die Gliederung der europäischen Normen. Folgende Neugliederung ist derzeit vorgesehen:

- 1 Anwendungsbereich
 - 2 Normative Verweisungen
 - 3 Begriffe
 - 4 Beurteilung der Gesteinskörnung
 - 5 Übereinstimmungsnachweis für Gesteinskörnungen
 - 6 Vorbeugende Maßnahmen
- Anhänge
- A (normativ) – Prüfungen an Gesteinskörnungen mit Opalsandstein einschließlich Kieselkreide und Flint
 - B (normativ) – Prüfungen weiterer Gesteinskörnungen
 - C (informativ) – Mörtelschnelltest (Alternativverfahren)
 - D (informativ) – Betonversuch bei 60 °C über Wasser (60 °C-Betonversuch)

Die beiden Berichtigungen zur Alkali-Richtlinie aus den Jahren 2010 und 2011

und Teile von Anlagen der Bauregelliste A/ Teil 1 werden in die Neuausgabe des Regelwerks aufgenommen. Die Arbeiten im Unterausschuss „Alkali-reaktion im Beton“ werden voraussichtlich im Jahr 2012 abgeschlossen, sodass eine Veröffentlichung der überarbeiteten Alkali-Richtlinie voraussichtlich im Jahr 2013 erfolgen kann (vgl. auch Abschnitt Alkali-Kieselsäure-Reaktion).

Bauproduktenverordnung – Auswirkungen der erweiterten Grundanforderungen

Einleitung

Die Bauproduktenrichtlinie (BPR) wurde durch die europäische Bauproduktenverordnung (BPV, siehe auch Kapitel IV) ersetzt, die unmittelbar in allen Mitgliedsstaaten gültig ist. Die Verordnung zielt darauf, technische Handelshemmnisse für Bauprodukte zu beseitigen und damit das Funktionieren des europäischen Binnenmarkts für Bauprodukte zu verbessern. Dieses Ziel soll durch die Harmonisierung technischer Spezifikationen, also unter anderem Produktnormen, erreicht werden. Im Gegensatz zu anderen Produkten beziehen sich die Anforderungen an Bauprodukte jedoch im Wesentlichen nicht auf das Produkt selbst sondern auf seine Anwendung im Bauwerk. Daher legen sowohl die BPR als auch die BPV Grundanforderungen an Bauwerke fest. Die neue BPV enthält unter anderem eine Erweiterung der Grundanforderungen an Bauwerke (BWR – Basic Work Requirement) Nr. 3 (Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz) sowie eine neu eingeführte Nr. 7 (Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen).

Die Auswirkungen dieser Grundanforderungen an Bauwerke auf harmonisierte Bauproduktennormen wurden in einem Forschungsvorhaben unter Federführung des VDZ im Auftrag des BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt und Raumforschung) untersucht. Im Forschungsvorhaben wurden die Normen und Mandate einiger beispielhafter Bauprodukte betrachtet und mit aktuellen gesetzlichen Anforderungen an Bauwerke in Europa verglichen. Dabei wurden auch mögliche künftige Regelungen modellhaft mit einbezogen, die insbesondere die Nachhaltigkeitsbewertung von Bauwerken betreffen. Inwieweit Umweltproduktdeklarationen (EPD) zur Umsetzung solcher Anforderungen genutzt werden können, wurde ebenfalls untersucht.

Inhalt der BWR 3 und BWR 7

Die Grundanforderung an Bauwerke Nr. 3 wurde mit der neuen BPV erweitert. Die

Änderungen zielen im Wesentlichen auf die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks ab. Darüber hinaus werden nicht nur Auswirkungen auf Hygiene und Gesundheit sondern auch auf die Umwelt und das Klima angesprochen.

Die Grundanforderung an Bauwerke Nr. 7 wurde neu aufgenommen und bezieht sich auf die nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen um – so Erwägungsgrund 55 der BPV – insbesondere der Recyclingfähigkeit des Bauwerks, seiner Baustoffe und Teile nach dem Abriss, der Dauerhaftigkeit des Bauwerks und der Verwendung umweltfreundlicher Rohstoffe und Sekundärbaustoffe für das Bauwerk Rechnung zu tragen. Die Grundanforderung Nr. 7 betrifft somit einen Teilaspekt des nachhaltigen Bauens.

Aus den Grundanforderungen an Bauwerke sollen laut Artikel 3, Absatz 2, wesentliche Produktmerkmale abgeleitet und in den harmonisierten technischen Spezifikationen festgelegt werden. Die wesentlichen Produktmerkmale sind dann in der Leistungserklärung (Artikel 4 bis 6 der BPV) des Bauprodukts und im CE Kennzeichen (Artikel 8 bis 9 der BPV) aufzulisten. Mit Werten deklariert werden müssen aber nur diejenigen wesentlichen Merkmale, die am beabsichtigten Verwendungsort des Bauprodukts gefordert werden. Für die übrigen Produktmerkmale kann NPd („no performance determined“) deklariert werden.

Anforderungen an Bauprodukte in Europa

Anhand einer Umfrage bei den für die betrachteten Bauprodukte zuständigen Verbänden wurden u. a. bestehende gesetzliche Anforderungen an Bauprodukte mit Bezug zu BWR 3 und BWR 7 ermittelt. Bezüglich BWR 3 bestehen an Bauprodukte gemäß der vorliegenden Informationen Anforderungen in Deutschland, den Niederlanden, Österreich, Polen und Tschechien. Dabei handelt es sich zum Einen um Anforderungen an die Radioaktivität von Baustoffen (Österreich, Polen und Tschechien) und zum Anderen um Anforderungen hinsichtlich gefährlicher organischer Inhaltsstoffe bzw. der Freisetzung von gefährlichen anorganischen Stoffen aus Bauprodukten (Niederlande, Deutschland). Die Anforderungen in Deutschland gelten üblicherweise aber nicht für genormte oder bereits bauaufsichtlich zugelassene Bauprodukte, sondern kommen nur im Rahmen von Zulassungsverfahren des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) zum Tragen.

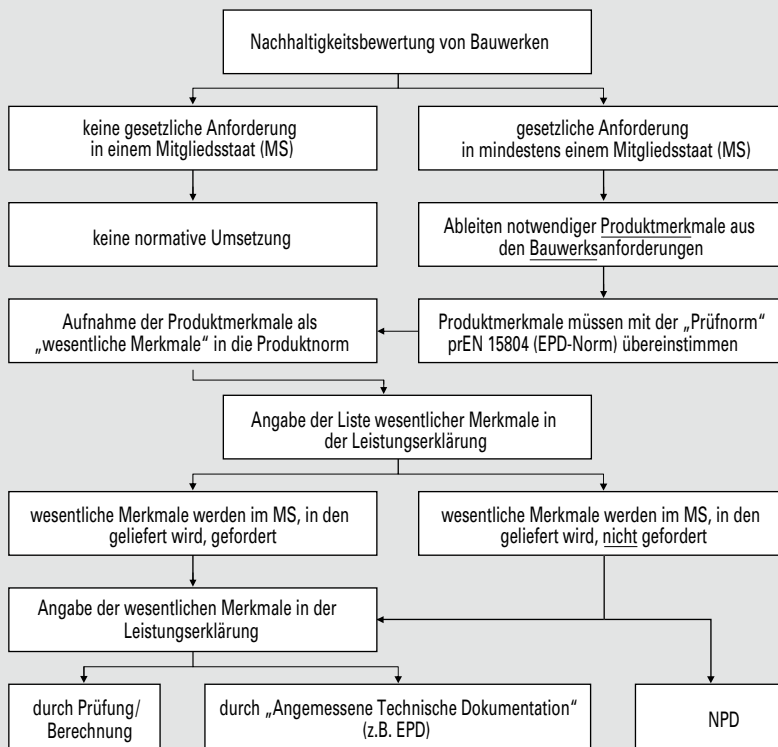


Bild V-57: Umsetzung gesetzlicher Anforderungen zur Nachhaltigkeitsbewertung von Bauwerken

CEN/TC 351 hat Arbeitsgruppen eingerichtet, um eine harmonisierte europäische Norm zur Bestimmung und Bewertung radioaktiver Strahlenbelastung durch Baustoffe zu entwickeln bzw. um Prüfverfahren gefährlicher Inhaltsstoffe bzw. ihrer Freisetzung zu harmonisieren (vgl. Kapitel VI Umwelt und Gesundheit, Europäische Bauproduktenrichtlinie).

Bezüglich der in der Bauproduktenverordnung neu aufgenommenen BWR 7 bestehen zum Aspekt der Dauerhaftigkeit bereits traditionell Anforderungen, auch wenn die Dauerhaftigkeit in keiner der Wesentlichen Anforderungen der Bauproduktenrichtlinie erwähnt wurde. In Deutschland werden sie z. B. aus der Musterbauordnung bzw. den Landesbauordnungen abgeleitet. Diese Dauerhaftigkeitsanforderungen sind in nationalen, aber auch schon in einigen harmonisierten Normen festgehalten und finden auch in Europäisch Technischen Zulassungen Anwendung.

Bezüglich der Bewertung der Nachhaltigkeit von Bauwerken scheinen zwei nationale Regelungen in Vorbereitung zu sein. Die schottische Bauverordnung soll dahin gehend geändert werden, dass Gebäude

grundsätzlich einen „Nachhaltigkeitswert“ einzuhalten haben. Wie dieser zu errechnen ist, bzw. welche Anforderungen sich damit an Bauprodukte ergeben, steht bisher nicht fest. In den Niederlanden wird derzeit eine neue Fassung des Baubeschlusses erarbeitet, dem zu Folge die Nachhaltigkeit von Gebäuden ebenfalls zu bewerten sein wird. Eine offizielle Entwurfsversion liegt bisher nicht vor.

Szenario: Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden als geltendes Recht

Im Forschungsvorhaben wurde ein Szenario betrachtet, wie sich eine gesetzliche Anforderung, die Nachhaltigkeit von Bauwerken zu bewerten, auf Bauprodukten auswirken würde. Das gewählte Szenario beschreibt die Umsetzung des Bewertungssystems nachhaltiges Bauen (BNB) in geltendes Recht. Dabei wurden ausschließlich diejenigen Aspekte betrachtet, die einen Bezug zu BWR 3 bzw. BWR 7 der Bauproduktenverordnung haben. Es wurde auch untersucht, ob sich Anforderungen hieraus mithilfe von Umweltproduktdeklarationen (EPDs) umsetzen lassen.

Das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) des Bundesministeriums für Ver-

kehr, Bau und Stadtentwicklung für Bundesgebäude ist ein Bewertungsverfahren für Büro- und Verwaltungsbauten. Dabei wird der gesamte Lebenszyklus von Gebäuden unter Berücksichtigung ökologischer, ökonomischer und soziokultureller Qualität sowie technischen und Prozessaspekten betrachtet. Das System ist dem der Deutschen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB) vergleichbar.

Anforderungen an die im Forschungsvorhaben betrachteten Bauprodukte lassen sich aus den Steckbriefen des BNB-Bewertungsschemas ableiten: Die Wirkung des Gebäudes über seinen gesamten Lebenszyklus auf die Umwelt wird als Umweltqualität des Gebäudes angesehen und mit Indikatoren beschrieben. Diese Indikatoren sind im Wesentlichen diejenigen, die auch in EPDs verwendet werden und entsprechend in den Normen des CEN/TC 350 „Nachhaltigkeit von Bauwerken“ (EN 15804 (Bauprodukte) und EN 15978 (Gebäude)) beschrieben sind. Für Bauprodukte wären also die Wirkungspotenziale für die Herstellung der Produkte, den Einbau, die Nutzung und ggf. die Entsorgung zu ermitteln. Mögliche weitere Verwendungen der Bauprodukte, sei es als Sekundärprodukt oder -brennstoff, wären einzubeziehen. Da sich aus diesem Szenario Anforderungen an ein Bauwerk mit Bezug zu den BWRs ergeben, wären die sich daraus ableitenden wesentlichen Produktmerkmale nach den oben genannten Normen zu berechnen und in harmonisierten technischen Spezifikationen (Produktnormen) umzusetzen. Damit würden Anforderungen an die Informationsbereitstellung gestellt, die ggf. im Rahmen der Leistungserklärungen der Bauprodukte zu beantworten wären. Die Bauproduktenverordnung ermöglicht es, alternativ, „Angemessene Technische Dokumentationen“ (Artikel 36) zu verwenden. Die Daten in der Leistungserklärung könnten damit z. B. auch aus einer Produkt-EPD stammen, wenn auf dieses Dokument verwiesen wird. Zum Nachweis der Konformität weist der Hersteller in diesem Fall nach, dass sein Bauprodukt dem- bzw. denjenigen entspricht, für das bzw. für die die genutzten Ergebnisse ermittelt wurden. Es sind sowohl spezifische Produkt-EPDs als auch Verbands- oder Durchschnitts-EPDs geeignet. Die Vorgehensweise bei der Umsetzung gesetzlicher Anforderungen zur Nachhaltigkeitsbewertung von Bauwerken ist in **Bild V-57** dargestellt.

Schlussfolgerungen aus dem Forschungsvorhaben

Der Ersatz der Bauproduktenrichtlinie durch die Bauproduktenverordnung ändert

weder die Zielsetzung noch die prinzipiellen Zuständigkeiten. Die Beseitigung technischer Handelshemmnisse auf dem europäischen Bauproduktenmarkt mithilfe harmonisierter technischer Spezifikationen bleibt das Ziel auch der Verordnung. Die Verordnung benennt ebenso wie die Richtlinie Grundanforderungen an Bauwerke. Die Konkretisierung bzw. Umsetzung in Anforderungen an Bauprodukte bleibt im Zuständigkeitsbereich der Mitgliedsstaaten. Diese legen unabhängig von den Formulierungen im Anhang I der Bauproduktenverordnung die wesentlichen Produktmerkmale fest, die sie als wichtig erachten, um Bauwerke so zu bauen, dass sie den Grundanforderungen genügen. Aus den Grundanforderungen an Bauwerke der Bauproduktenverordnung leitet sich nicht automatisch die Forderung nach neuen Produktmerkmalen ab. Werden neue Anforderungen gestellt, so müssen diese mit harmonisierten Normen übereinstimmen, soweit das möglich ist. Bestehen zu einer (neuen) Produkthanforderung keine harmonisierten Normen, so sind diese zu erstellen. Auch aus den harmonisierten Produktnormen leiten sich für die einzelnen Mitgliedsstaaten nicht zwingend Anforderungen ab, alle in diesen Normen beschriebenen Produktmerkmale zu verwenden bzw. in gesetzlichen Regelungen zu erfassen. Es existiert die Möglichkeit, „no performance determined“ zu deklarieren (NPD-Option).

Wesentliche Produktmerkmale bezüglich gefährlicher Stoffe, die sich aus gesetzlichen Regelungen mit Bezug auf BWR 3 ergeben, werden nach Abschluss der Arbeiten des CEN/TC 351 voraussichtlich mit den dort harmonisierten Prüfverfahren zu deklarieren sein. In der Leistungserklärung zu einem Bauprodukt könnten dann Angaben zum Vorhandensein oder zur Auslaugung gefährlicher Stoffe gemacht werden. Alternativ könnte auch hier ggf. „NPD“ deklariert werden.

Es existieren aber auch Anforderungen an Bauwerke, die nicht in direkte Produkthanforderungen übertragen werden können. Hierzu gehören auch Anforderungen, die sich auf BWR 3 (z. B. „Treibhausgase“) und BWR 7 („Nachhaltigkeit und Recycling“) der BPV beziehen. Würde an ein Bauwerk beispielsweise eine Anforderung an die Einhaltung bestimmter Grenzwerte der Treibhausgasemissionen gestellt, so folgt daraus nicht unmittelbar, dass auch Bauprodukte einen Grenzwert bezüglich Treibhausgasen einhalten müssten. Es müssten dann von Seiten der Bauprodukthersteller aber Informationen bereit-

gestellt werden, die für die Gebäudebewertung relevant sind. Im genannten Beispiel wären dies die Treibhausgase, die bei der Herstellung und dem Transport des Bauprodukts anfallen, aber auch Parameter wie beispielsweise die Wärmeleitfähigkeit eines Dämmstoffs, die eine Berechnung des Energieverbrauchs und damit auch der Treibhausgasemissionen während der Nutzungsphase des Bauwerks ermöglichen. Alle Parameter wären nach harmonisierten Normen zu bestimmen. Die Angabe aller Parameter im CE Kennzeichen eines Bauprodukts – wie in der BPV gefordert – ist jedoch aus verschiedenen Gründen nicht sinnvoll. Zum Einen würde die Anzahl der möglichen Parameter, wie sie beispielsweise zur Bewertung der Nachhaltigkeit eines Bauwerks nötig wären, den Umfang des CE Kennzeichens in unnötigem Maße erhöhen. Zum Anderen würde die Angabe dieser Werte auf dem CE Kennzeichen aber auch ein Qualitätsmerkmal des jeweiligen Bauprodukts suggerieren, obwohl dies nicht der Zweck dieser Parameter ist.

Es bleibt abzuwarten, welche Entwicklung die Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden in Europa nehmen wird. Es scheint absehbar, dass Daten für Bauprodukte für derartige Nachhaltigkeitsbewertungen verstärkt nachgefragt werden.

Brandschutz ■

Im Brandschutz wird gemeinhin zwischen vorbeugenden und abwehrenden Maßnahmen unterschieden. Der abwehrende Brandschutz greift erst dann, wenn bereits ein Brand entstanden ist und umfasst im Wesentlichen Löscharbeiten durch die Feuerwehr. Im Gegensatz dazu soll der vorbeugende Brandschutz dazu dienen, die Entstehung und Ausbreitung von Bränden zu vermeiden oder einzuschränken. Der bauliche Brandschutz ist neben dem anlagentechnischen Brandschutz, welcher insbesondere Brandmeldeanlagen und automatische Feuerlöschanlagen umfasst, die wesentliche Grundlage für die notwendige Sicherheit im Bereich des vorbeugenden Brandschutzes. 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 nichtbrennbaren Baustoff Beton lassen sich Bauteile mit einem hohen Feuerwiderstand und einer entsprechend beständigen 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.

Einführung der Eurocodes in Deutschland

Nach dem „Leitpapier L“ zur Nutzung der Eurocodes, das die Europäische Kommission im November 2003 herausgegeben hatte, war eine vollständige Einführung der Eurocodes bis zum Jahr 2010 vorgesehen. Dieses Ziel konnte in Deutschland wie auch in vielen anderen EU-Mitgliedsstaaten nicht erreicht werden. Die den Stahlbetonbau betreffenden Teile des Eurocode EN 1992-1-1 (Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau), EN 1992-1-2 (Brandbemessung) und EN 1992-3 (Silos und Behälterbauwerke) mit ihren Nationalen Anhängen liegen seit Dezember 2010 bzw. Januar 2011 in endgültiger Fassung vor und dürfen seitdem in Deutschland parallel zu den bisherigen nationalen Regelwerken angewendet werden. Die endgültige bauaufsichtliche Einführung der Eurocodes erfolgte durch die deutschen Bundesländer zum Stichtag 01.07.2012. Entsprechend wurden die Eurocodes in den Änderungen der Musterliste der Technischen Baubestimmungen vom Dezember 2011, die von den Bundesländern ab Juni 2012 umgesetzt wurden, als technische Regeln aufgenommen.

Der Eurocode 2, Teil 1-2, der die Brandbemessung von Betonbauteilen regelt, erlaubt es ergänzend zur „traditionellen“ Bauteilbemessung über Tabellen auch, so genannte „vereinfachte“ oder „allgemeine“ Bemessungsverfahren anzuwenden. Bei den

allgemeinen Bemessungsverfahren handelt es sich um Ingenieurmethoden des Brandschutzes (FSE nach engl. Fire Safety Engineering). Diese wurden in den vergangenen 10 bis 15 Jahren entwickelt. Ihr Ziel ist eine möglichst realistische, ganzheitliche Abschätzung der Auswirkungen von Bränden auf ein Gebäude oder einen Gebäudeteil. Man will sich also nicht mehr darauf beschränken, Einzelbauteile auf Normbrände zu bemessen. In einer typischen Bemessung mittels Ingenieurmethoden des Brandschutzes werden zunächst Schutzziele definiert. Vorrangiges Schutzziel ist das Leben und die Gesundheit von Personen, es können aber auch Sachschutzziele festgelegt werden. Brände werden unter Berücksichtigung der tatsächlich vorhandenen Brandlasten und der Geometrie der betrachteten Brandabschnitte modelliert und die thermischen und mechanischen Auswirkungen auf die umgebenden Bauteile werden bestimmt. Berücksichtigt werden z. B. eine automatische Branderkennung oder eine aktive Brandbekämpfung über automatische Feuerlöschanlagen oder die Feuerwehr. Oftmals werden Computerprogramme eingesetzt, um die Auswirkungen eines Brands oder das Verhalten von Personengruppen bei Flucht aus einem brennenden Gebäude zu simulieren. In vielen Fällen werden durch FSE die Anforderungen an den Brandschutz der Einzelbauteile verringert.

Die Entscheidung, ob die Verwendung von allgemeinen Rechenverfahren in einem Mitgliedsstaat zulässig ist, ist in den Nationalen Anhängen geregelt. Viele Mitgliedsstaaten lassen die Anwendung nur mit Einschränkungen zu. So wird beispielsweise festgelegt, dass die Anwendung auf Spezialisten mit ausreichender Erfahrung beschränkt bleibt. Diese Einschränkungen sind zu befürworten, da ein unsachgemäßes Vorgehen bei der Anwendung von FSE leicht zu unzutreffenden Einschätzungen bzw. Bewertungen bei den Berechnungen und damit zu falschen Ergebnissen bei den Anforderungen führen kann.

Nationale Restnorm zur Brandbemessung

Das DIN ist als Mitglied im Europäischen Komitee für Normung (CEN) verpflichtet, die den Eurocodes entgegenstehenden nationalen Planungs- und Bemessungsnormen zurückzuziehen. Der Inhalt der DIN 4102-4, nach der bislang die Brandbemessung in Deutschland erfolgte, wird allerdings nicht vollständig durch die Eurocodes für die Brandbemessung abgedeckt. So werden in den Eurocodes z. B. nichttragende und raumumschließende

Bauteile nicht geregelt, des Weiteren sind Hinweise zur baulichen Durchbildung nur begrenzt enthalten. Die Industrie und deren Verbände hatten daher weiterhin Bedarf an Regelungen der DIN 4102-4 und haben die Erarbeitung einer „DIN 4102-4 Restnorm“ in die Wege geleitet, um weiterhin umfassende Normungsregelungen für ihre Produkte zur Verfügung zu haben. Auch der VDZ ist an der Erarbeitung der Restnorm für die Brandbemessung von Beton beteiligt. Die Restnorm wird der Praxis weiterhin wichtige Regelungen und Informationen, die den Eurocodes nicht widersprechen, zur Verfügung stellen. Beispiele für ergänzende, den Brandschutz-Eurocodes nicht widersprechende Regelungen sind:

- Berücksichtigung von Putzen als Ersatz von Beton für den Achsabstand der Bewehrung bei der Festlegung der Feuerwiderstandsklasse eines Stahlbetonbauteils
- Angaben zur konstruktiven Ausbildung von Betonbauteilen wie z. B. Konsolen, Auflagern, usw.
- Angaben zur Ausbildung von Fugen und Anschlüssen bei Betonfertigteilen
- Bemessung von Stahlbetonhohlplatten und Rippendecken
- Bemessung gegliederter Stahlbetonwände

Es wird erwartet, dass eine Veröffentlichung der „DIN 4102-4 Restnorm“ gegen Ende 2012 bzw. Anfang 2013 erfolgen kann.

Revision der Eurocodes

Nach den Regeln des CEN sind Normen fünf Jahre nach ihrer Veröffentlichung zu überprüfen.

Aktuell ist der Zeitplan für die Revision der Eurocodes wie folgt vorgesehen:

- März 2013: Beginn der Überprüfung der vorliegenden Eurocodes fünf Jahre nach ihrer Veröffentlichung; darüber hinaus sind neue Eurocodes für die statische Beurteilung von Bestandsbauten sowie für die Bemessung von Bauteilen aus Glas und faserverstärkten Kunststoffen geplant.
- Oktober 2015: Beginn der Umfrage unter den nationalen Spiegelgremien zu den überarbeiteten und neuen Eurocodes (CEN Enquiry)
- Oktober 2017: Beginn der formalen Abstimmung zu den überarbeiteten und neuen Eurocodes (CEN formal vote)
- Oktober 2018: Veröffentlichung der zweiten Eurocode-Generation

Für die Revision der Eurocodes zur Bemessung von Stahlbeton hat sich das zuständige Normungsgremium CEN/TC 250/SC2 so organisiert, dass unter einer übergeordneten koordinierenden Arbeitsgruppe (WG1) mehrere Untergruppen (Task Groups) gebildet werden, die sich jeweils mit einzelnen Problemstellungen im Rahmen der Revision der Eurocodes beschäftigen. Eine Arbeitsgruppe (TG 5) soll sich mit der Überarbeitung des Eurocodes für die Brandbemessung von Beton beschäftigen. Im Rahmen der europäischen Zusammenarbeit auf der Ebene der European Concrete Platform (ECP) soll die European Cement Research Academy (ECRA) die weiteren Arbeiten an den Eurocodes, die Beton und Brandschutz betreffen, in der TG 5 des CEN/TC 250/SC 2 in Zukunft aktiv begleiten.

Gutachten ■

Beispiele für betontechnische Gutachten und Beratung

Die Nachfrage nach betontechnischer Beratung und gutachterlicher Tätigkeit durch das Forschungsinstitut der Zementindustrie war auch im Berichtszeitraum ungebrochen. Als Schwerpunkte sind zu nennen:

- Zulassungsuntersuchungen für neue Zemente
- Begutachtung von Trinkwasserbehältern
- Bewertung von Gesteinskörnungen und Betonen im Hinblick auf die Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion (vgl. Abschnitt Alkali-Kieselsäure-Reaktion)
- Entwicklung optimierter Beton- und Mörtelmischungen für den jeweiligen Anwendungsbereich des Kunden

Spezialisten für alle betontechnischen Fragen, die in nationalen und internationalen Gremien vertreten sind und über umfassende Erfahrungen aus Labor und Praxis verfügen, erarbeiten effiziente Lösungen der zum Teil komplexen Problemstellungen. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit mit den Experten aus den Fachbereichen der Mineralogie, Chemie, Physik und Verfahrenstechnik der anderen Abteilungen des Forschungsinstituts der Zementindustrie ist in diesem Zusammenhang von besonderem Vorteil.

Zulassungsprüfungen

Durch Zulassungsprüfungen kann die Eignung von Bauprodukten (z. B. Zemente) für bestimmte Produkt- bzw. Anwendungsbereiche untersucht werden. Im For-

schungsinstitut der Zementindustrie wurden Zulassungsprüfungen zur Erlangung allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassungen (abZ) für die Anwendung von Zement, Europäisch Technischer Zulassungen (ETA) und von KOMO-Attesten mit Produktzertifikat gemäß CUR 48 für die Anwendung von Zementen in den Niederlanden durchgeführt. Alle Stufen des Zulassungsverfahrens, wie die Antragstellung, die Erstellung und Durchführung des Versuchsprogramms, des Prüfberichts und eines Gutachtens über die Eignung des Produkts, werden in den Zulassungsverfahren bearbeitet. In der Regel erfolgt im Rahmen solcher Zulassungsverfahren die Probenahme der Zementhaupt- und -nebenbestandteile sowie des zuzulassenden Zements durch einen Vertreter des Forschungsinstituts der Zementindustrie am Ort der Zementherstellung. Der Zement und die Zementbestandteile werden gemäß den Vorgaben der Zulassungsstelle charakterisiert. Mit dem Zement werden Betone für die Prüfung mechanischer und dauerhaftigkeitsrelevanter Kennwerte hergestellt. Die Ergebnisse der Prüfungen werden in einem Prüfbericht zusammengefasst. Darüber hinaus gehende Fragestellungen zur Eignung eines Produkts können durch Gutachten beantwortet werden.

Sanierung von Trinkwasserbehältern

Das Forschungsinstitut der Zementindustrie begleitet die Sanierung des Trinkwasserbehälters Heisterberg durch die Stadtwerke Hannover bereits seit 2003. Bei dem Trinkwasserbehälter Heisterberg handelt es sich um einen Hochbehälter, der aus drei Kammern besteht. Die Kammern haben zusammen ein Fassungsvermögen von ca. 45 000 m³. Die Grundflächen der Kammern betragen jeweils rd. 240 m² mit insgesamt über 230 Stützen. Im Rahmen der Begutachtungstätigkeit durch das Forschungsinstitut der Zementindustrie wurden in den Kammern zunächst Zustandsanalysen durchgeführt. Hierbei wurden Bohrkern entnommen, an denen im Rahmen von Laboruntersuchungen der Schichtaufbau, die Betondeckung der Bewehrung, die Gesamtporosität sowie die Betondruckfestigkeit des Behälterbodens, der Wand- und Deckenkonstruktionen sowie der Stützen ermittelt wurden. Weiterhin wurde die Oberflächenzugfestigkeit der vorhandenen Beschichtung bestimmt. Ergänzend wurden an Probekörpern, die z. B. Ausblühungen oder Abplatzungen aufwiesen, rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen durchgeführt. Diese Untersuchungen stellten die Grundlage für die spätere Sanierung des Trinkwasserbehälters



Bild V-58: Experten des Forschungsinstituts der Zementindustrie im Einsatz in Trinkwasserbehältern – Kompetente Beratung und Prüfung der Einhaltung der Anforderungen gemäß den Technischen Regeln der DVGW-Arbeitsblätter W 270, W 300, W 347

Foto: enercity/Stadtwerke Hannover

dar. Im Zuge der Sanierungsmaßnahmen wurden durch das Forschungsinstitut der Zementindustrie baubegleitende Untersuchungen zur Qualitätssicherung durchgeführt (**Bild V-58**). An gestrahlten bzw. beschichteten Oberflächen wurde die Oberflächenzugfestigkeit im Abreißversuch ermittelt, um die Eignung des Betonuntergrunds bzw. der Beschichtung zu beurteilen. Die Porosität der Beschichtung wurde mittels Quecksilberdruckporosimetrie bestimmt, um die Beschichtung hinsichtlich der Anforderungen des DVGW-Merkblatts W300 zu bewerten.

Gutachten Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Zur Vermeidung von Schäden infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) müssen ausreichend alkaliunempfindliche Gesteinskörnungen bzw. Betone verwendet werden. Die Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen kann mit Prüfungen nach Alkali-Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) oder nach RILEM untersucht werden. In den Fällen, in denen die Alkali-Richtlinie einen Austausch der Gesteinskörnung oder den Einsatz von NA-Zement festlegt, kann auch die Alkaliunempfindlichkeit einer Betonzusammensetzung durch eine Performance-Prüfung nachgewiesen werden.

Bei Fahrbahndecken aus Beton (z. B. auf Flugbetriebsflächen oder Autobahnen) ist das Risiko des Entstehens einer schädigenden AKR besonders hoch, da mit den Tau- bzw. Enteisungsmitteln zusätzlich Alkalien von außen in den Beton eindringen können. Deshalb ist es mittlerweile in vielen Fällen üblich, die Alkalireaktivität von Betonen für Autobahnen und Flugbetriebsflächen in einer Performance-Prüfung durch einen Gutachter beurteilen zu lassen. Das Forschungsinstitut der Zementindustrie ist hierfür als Gutachter von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) bzw. vom Verkehrsministerium (BMVBS) anerkannt. Im Berichtszeitraum erstellte das Forschungsinstitut der Zementindustrie für verschiedene Bauvorhaben Gutachten:

- 24 Betone für die Feuchtigkeitsklasse WS (18 Performance-Prüfungen und sechs gutachterliche Stellungnahmen)
- 6 Betone für Flugbetriebsflächen und Fertigteile, die auf Flughafen eingesetzt werden und mit Flughafen spezifischen Flächenenteisungsmitteln in Kontakt kommen (vier Performance-Prüfungen und zwei gutachterliche Stellungnahmen)
- Vier Gutachten zur Schädigung von Betonbauteilen (zwei Brücken, sieben Lose einer Fahrbahndecke und ein Funkturm)
- Vier Betone der Feuchtigkeitsklasse WA

VI

Umwelt und Gesundheit

129



Foto: HeidelbergCement

Zementwerk in Süddeutschland

Umweltkriterien für zementgebundene Baustoffe ■

Zement ist das wichtigste Bindemittel für den Bausektor und wird in sehr großen Mengen zur Errichtung zuverlässiger, dauerhafter und umweltfreundlicher Betonbauteile und -werke produziert. So betrug der weltweite Zementverbrauch im Jahr 2009 etwa 3 Mrd. t, und es ist davon auszugehen, dass sich dieser Verbrauch in den kommenden Jahren – insbesondere in den Schwellenländern – noch deutlich steigern wird. Aufgrund der sehr großen Produktionsmengen kommt einer umweltverträglichen Zementherstellung und -verwendung eine enorme Bedeutung zu.

Die deutsche Zementindustrie hat bereits seit vielen Jahren die Umweltverträglichkeit von Zement und Beton in allen Lebensphasen intensiv untersucht. Dabei stand zunächst die umweltverträgliche Zementherstellung im Vordergrund. Umfangreiche Untersuchungen des Forschungsinstituts der Zementindustrie haben belegt, dass die Immissionssituation am Standort eines Zementwerks durch dieses nur geringfügig beeinflusst wird.

Mit dem zunehmenden Einsatz von alternativen Roh- und Brennstoffen bei der Zementherstellung richtete sich der Fokus verstärkt auf das Produkt Zement. Bei der Verwendung alternativer Einsatzstoffe in deutschen Zementwerken werden sehr strenge Qualitätskriterien angewendet. Hierdurch wird sichergestellt, dass die Emissionen, die Gleichmäßigkeit und die bautechnischen Eigenschaften des Zements sowie seine Umweltverträglichkeit nicht beeinträchtigt werden. So liegt beispielsweise der Spurenelementgehalt deutscher Normzemente in der gleichen Größenordnung wie die Gehalte in natürlichen Gesteinen, Böden oder Tonen. Dies gilt unabhängig davon, ob bei der Zementherstellung alternative Einsatzstoffe verwendet werden oder nicht.

Einsatz alternativer Roh- und Brennstoffe

Der Klinkerbrennprozess ist ein hochenergetischer Stoffumwandlungsprozess, der sich durch hohe Brennguttemperaturen von etwa 1450 °C, einen intensiven Kontakt zwischen den Feststoffen und dem Ofengas mit Temperaturen bis 2000 °C sowie stark basisches Brenngut auszeichnet. Aufgrund dieser prozesstechnischen Gegebenheiten sind Drehrohrofenanlagen der Zementindustrie sehr gut für die zuverlässige

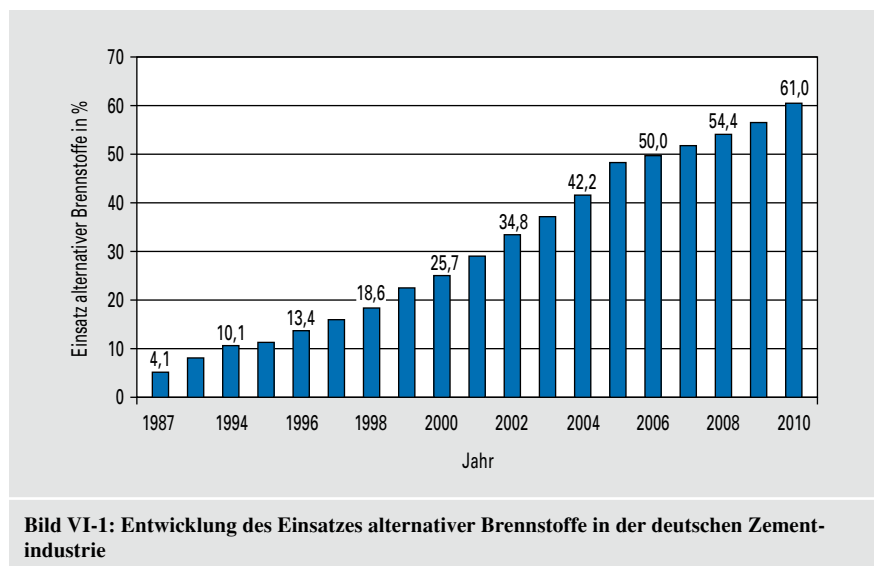


Bild VI-1: Entwicklung des Einsatzes alternativer Brennstoffe in der deutschen Zementindustrie

und umweltverträgliche stoffliche und energetische Verwertung zahlreicher alternativer Einsatzstoffe geeignet.

Alternative Rohstoffe können je nach der gegebenen Rohstoffsituation eines Zementwerks als Rohmaterialkomponenten bzw. als Korrekturstoffe für die Rohmischung genutzt werden. Dabei werden für die Klinkerherstellung hauptsächlich Industriekalke, Gießereialsande, Kiesabbrand, Flugaschen sowie Reststoffe aus der Eisen- und Stahlindustrie eingesetzt. Bei der Zementmahlung werden insbesondere Hütten- und Gipse aus der Rauchgasentschwefelung verwertet.

Im Berichtszeitraum wurde der Einsatz alternativer Brennstoffe in der deutschen Zementindustrie weiter gesteigert (**Bild VI-1**). So wurden im Jahr 2010 rd. 61 % des Gesamtbrennstoffenergieverbrauchs durch aufbereitete Industrie- und Gewerbeabfälle, Tiermehl, Altreifen, Altöl, aufbereitete Siedlungsabfälle, Klärschlamm usw. gedeckt. Die energetische Verwertung leistet einen Beitrag zur CO₂-Minderung, ohne dass dabei produktionsspezifische Reststoffe anfallen. Unabhängig von den eingesetzten Brennstoffen sind die Emissionskonzentrationen organischer Verbindungen sehr gering, da die hohen Temperaturen der Drehrohrofenfeuerung gewährleisten, dass organische Substanzen praktisch vollständig zu Kohlendioxid und Wasser umgesetzt werden.

Spurenelemente im Zement

Alle aus natürlichen Rohstoffen hergestellten Baustoffe enthalten in geringen Mengen Spurenelemente. Der Spurenelementgehalt in Zementen ergibt sich aus den Gehalten in den Hauptbestandteilen Portlandzementklinker, Puzzolane, Flugasche,

gebrannter Schiefer, Kalkstein und Silicastaub sowie den Nebenbestandteilen, Calciumsulfat und den Zementzusätzen. Für den Spurenelementgehalt im Portlandzementklinker sind im Wesentlichen deren Gehalte in den zur Klinkerherstellung verwendeten Rohmaterialien maßgebend. Diese Gehalte können sich dann entsprechend der geochemischen Zusammensetzung der Rohstoffvorkommen unterscheiden.

Werden bei der Klinkerherstellung primäre Einsatzstoffe durch geeignete alternative Roh- bzw. Brennstoffe ersetzt, so ist deren Spurenelementgehalt ein wichtiges Qualitätskriterium, denn je nach deren Flüchtigkeit und den Prozessbedingungen verbleiben diese mehr oder weniger vollständig im Klinker. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die alternativen Einsatzstoffe lediglich einen entsprechenden Anteil ebenfalls spurenelementhaltiger primärer Einsatzstoffe ersetzen. Bei der heute üblichen Verwendung sorgfältig ausgewählter und überwachter alternativer Einsatzstoffe in der deutschen Zementindustrie können sowohl geringfügige Erhöhungen als auch Verminderungen der Spurenelementgehalte in den Zementen auftreten. Generell werden diese Veränderungen jedoch durch die natürlichen Konzentrationsschwankungen in den primären Einsatzstoffen überdeckt.

Bereits im Jahr 1995 untersuchte das Forschungsinstitut der Zementindustrie erstmalig etwa 100 Portlandzemente aus dem Überwachungszeitraum 1994 bezüglich der Gehalte von zehn Spurenelementen. 1999, 2002 und 2006 wurden sämtliche in Deutschland hergestellten und durch das Forschungsinstitut überwachten Zemente aus einer Prüfperiode der Jahre 1998, 2001 und 2005 hinsichtlich der Gehalte der im

nationalen Luftreinhalte recht vorgesehenen Elemente zuzüglich Beryllium und Zink analysiert. Im Berichtszeitraum wurde erneut mit der Untersuchung aller Zemente einer Prüfperiode des Jahres 2011 begonnen, um die Datenbasis zu aktualisieren und weiter zu vertiefen. Die Auswertung der vorliegenden Analysen zeigt, dass sich die Mittelwerte der Spurenelementgehalte der untersuchten Normzemente für die fünf Herstellungszeiträume nicht signifikant verändert haben (**Bild VI-2**), obwohl sich der Einsatz alternativer Brennstoffe von 1994 bis 2011 mehr als versechsfacht hat (vgl. Bild VI-1).

Spurenelementfreisetzung

Das Auslaugverhalten umweltrelevanter Bestandteile aus zementgebundenen Baustoffen ist sehr gut untersucht und es liegen zahlreiche wissenschaftlich abgesicherte Ergebnisse vor. Diese belegen, dass in zementgebundenen Baustoffen Spurenelemente oder kritische organische Verbindungen nur in sehr geringen Mengen enthalten sind und dass die Freisetzung dieser Spurenstoffe während der Nutzung der Bauwerke sehr gering ist. Dies gilt auch für Zemente und Betone, bei deren Herstellung alternative Roh- bzw. Brennstoffe sowie Betonzusatzstoffe, wie zum Beispiel Steinkohlenflugaschen, verwendet werden. Hingegen gab es bislang nur wenige Erkenntnisse darüber, ob und wie Betonzusatzmittel das Auslaugverhalten von Spurenelementen beeinflussen. Um diese Kenntnislücke zu schließen, wurde im Forschungsinstitut der Zementindustrie das von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) geförderte Forschungsvorhaben „Einfluss von Betonzusatzmitteln auf das Auslaugverhalten von Spurenelementen aus Festbetonen“ durchgeführt.

Die moderne Betontechnologie ist in starkem Maße auf den Einsatz von Betonzusatzmitteln ausgerichtet. So sind zahlreiche Betoneigenschaften ohne Betonzusatzmittel nicht zu erzielen und viele Bauaufgaben lassen sich nur durch die Verwendung von Betonzusatzmitteln bewältigen. Dementsprechend werden heutzutage in Deutschland mehr als 90 % aller Betone mit Betonzusatzmitteln hergestellt. Die Wirkstoffe dieser Mittel sind in vielen Fällen organische oder anorganische Verbindungen mit mehreren funktionellen Gruppen, wie zum Beispiel Sulfat-, Sulfonat-, Hydroxyl- oder Carbonylgruppen, die starke Wechselwirkungen mit positiv geladenen Partikeln oder Spurenelementen (Komplexierung) eingehen können. Diese Reaktionen könnten zu Ausflockungen,

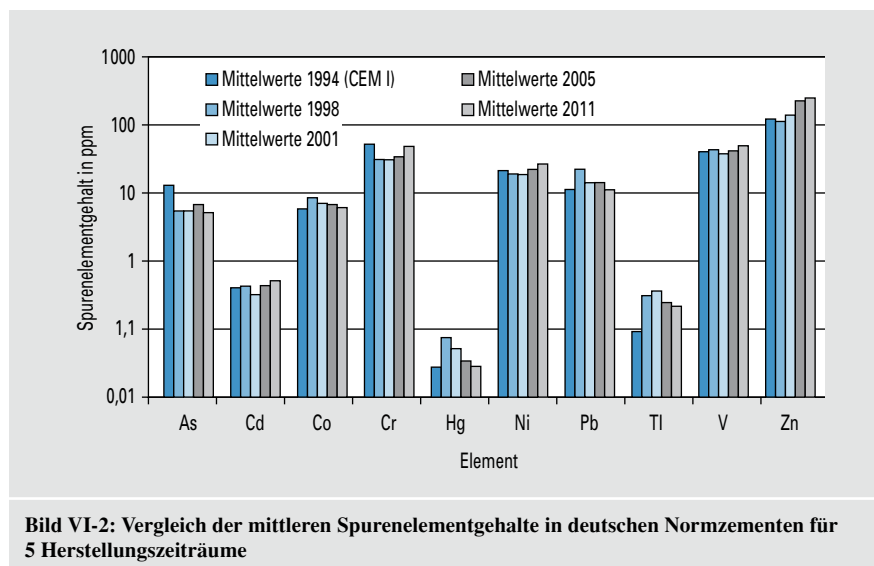


Bild VI-2: Vergleich der mittleren Spurenelementgehalte in deutschen Normzementen für 5 Herstellungszeiträume

Tafel VI-1: Übersicht über die bei den Untersuchungen eingesetzten Betonzusatzmittel bzw. Wirkstoffe

Nr.	Betonzusatzmittel bzw. Wirkstoff	Nr.	Betonzusatzmittel bzw. Wirkstoff
1	Ligninsulfonat	8	Phosphonsäure
2	Melaminsulfonat	9	Pyrophosphat
3	Naphthalinsulfonat	10	Zucker
4	Polycarboxylatether A	11	Methylcellulose
5	Polycarboxylatether B	12	Zinn(II)-sulfat
6	Wurzelharz	13	Eisen(II)-sulfat
7	Alkylpolyglycolethersulfat		

aber auch zu erhöhten Löslichkeiten/Auslaugungen führen.

In dem Forschungsvorhaben wurden elf handelsübliche Betonzusatzmittel sowie zwei Ausgangsstoffe für Chromatreduzierer eingesetzt (**Tafel VI-1**). Als Zemente wurden zwei Portlandzemente CEM I 42,5 R und ein Hochofenzement CEM III/A 42,5 N mit möglichst hohen Barium-, Chrom-, Nickel- und Vanadiumgehalten verwendet. Die Betone wurden in Anlehnung an die DIBt-Grundsätze, Teil II „Betonangangsstoffe und Beton“ hergestellt und gelagert. Die Betonzusatzmittel bzw. Wirkstoffe wurden in der zulässigen und der zweifachen zulässigen Höchstkonzentration verwendet. Die Auslauguntersuchungen wurden an Betonwürfeln (10 cm x 10 cm x 10 cm) entsprechend der DAfStb-Richtlinie „Bestimmung der Freisetzung anorganischer Stoffe durch Auslaugung aus zementgebundenen Baustoffen“ durchgeführt.

Beim Vergleich der Auslaugergebnisse für die 98 hergestellten Betone lassen sich keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen der Zusatzmittelart bzw. -konzentration

und den festgestellten Freisetzungsmengen erkennen. Die Auslaugwerte der Betone mit Zusatzmitteln entsprechen dem Niveau der Referenzbetone ohne Zusatzmittel. Die Gehalte in den Eluat lagen für die Elemente Quecksilber (Hg), Molybdän (Mo), Selen (Se) und Tellur (Te) in allen Fällen unterhalb der Bestimmungsgrenze der eingesetzten, sehr nachweisstarken Analysemethoden. Für die Elemente Arsen (As), Beryllium (Be), Cadmium (Cd), Cobalt (Co), Zinn (Sn) und Thallium (Tl) lagen die meisten Eluatgehalte unterhalb der Bestimmungsgrenze.

Die Bewertung der Auslauguntersuchungen erfolgte gemäß dem Teil II der DIBt-Grundsätze. Dabei zeigte sich, dass in den meisten Fällen kumulierte Auslaugmengen auftreten, die weniger als 25 % der maximal zulässigen Freisetzungsmenge betragen. Höhere kumulierte Auslaugmengen, die 50 % der maximal zulässigen Freisetzungsmenge überschreiten, wurden nur für die Elemente Nickel (Ni), Blei (Pb), Vanadium (V) und Zink (Zn) festgestellt. Überschreitungen der maximal zulässigen Freisetzungsmenge traten in keinem Fall auf.

Insgesamt bestätigen diese Ergebnisse erneut die sehr gute Bindekapazität zementgebundener Baustoffe für Spurenelemente. Dies gilt insbesondere, wenn berücksichtigt wird, dass bei den Untersuchungen bewusst Zemente mit möglichst hohen Spurenelementgehalten eingesetzt wurden, und dass sich durch die überhöhten Zusatzmittelkonzentrationen teilweise sehr stark gestörte Betone, zum Beispiel mit Luftporengehalten von mehr als 20 Vol.-% oder 56-Tage-Druckfestigkeiten von etwa 2 N/mm², ergaben.

Produktbezogener Arbeits- und Gesundheitsschutz ■

Der produktbezogene Arbeits- und Gesundheitsschutz hat während der letzten Jahre aufgrund neuer sowie aktualisierter Gesetze, Regelungen und Verordnungen sowohl auf europäischer als auch nationaler Ebene an Bedeutung gewonnen. Durch diese Regelwerke (s. **Bild VI-3**) sollen Arbeitnehmer genauso wie private Verbraucher vor Gefahren geschützt werden, die von den Produkten ausgehen können. Darüber hinaus umfasst ein Teil dieser Regelwerke auch mögliche ökotoxikologische Auswirkungen. Die Unternehmen der Zementindustrie sind sowohl als Arbeitgeber als auch als Hersteller und Inverkehrbringer von Stoffen und Gemischen, die überwiegend im Baugewerbe und im privaten Sektor Verwendung finden, betroffen. Zu den hergestellten Stoffen zählen Portlandzementklinker und Flue dust (Staub aus der Klinkerherstellung). Zemente und alle anderen formulierten Produkte, wie z.B. Frisch- oder Trockenmörtel, gelten als Gemische. Zu berücksichtigen sind allerdings auch Endprodukte, also Erzeugnisse wie fertige Bauteile und Bauwerke.

Die sich aus den Regelwerken ergebenden Anforderungen für die Unternehmen der Zementindustrie werden regelmäßig in den Gremien des VDZ, insbesondere im Ausschuss Zementchemie und in der Arbeitsgruppe REACH, gespiegelt.

REACH- und CLP-Verordnung

Obwohl die REACH-Verordnung bereits seit dem 01.06.2007 in Kraft ist, ergaben sich einige Verpflichtungen zur Umsetzung erst im Berichtszeitraum. Für die Unternehmen der Zementindustrie betraf dies insbesondere:

- die Notifizierung von Portlandzementklinker,
- die Registrierung von Flue dust sowie
- die Aktualisierung der Sicherheitsdatenblätter.

REACH-VO Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), vom 18.12.2006 inklusive der Verordnung (EU) Nr. 453/2010 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 vom 20.05.2010

CLP-VO Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen im Rahmen des in der EU eingeführten Global Harmonisierten Systems (GHS) vom 16.12.2008

ChemG – Chemikaliengesetz, Gesetz zum Schutz vor gefährlichen Chemikalien in der Neufassung vom 02.11.2011

GefStoffV – Gefahrstoffverordnung vom 26.11.2010

TRGS 559 – Technische Regeln für Gefahrstoffe 559 Mineralischer Staub vom Februar 2011

Bauprodukten-VO Verordnung (EU) Nr. 305/2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten vom 09.03.2011

Bild VI-3: Neue bzw. aktualisierte nationale und europäische Regelwerke zum produktbezogenen Arbeits- und Gesundheitsschutz

	Portlandzementklinker (EC: 266-043-4; CAS: 65997-15-1) GEFAHR H315: Verursacht Hautreizungen. H317: Kann allergische Hautreaktionen hervorrufen. H318: Verursacht schwere Augenschäden. H335: Kann die Atemwege reizen. P280: Schutzhandschuhe/Schutzkleidung/Augenschutz/Gesichtsschutz tragen. P305 + P351 + P330: BEI BERÜHRUNG MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser ausspülen und sofort Giftinformationszentrum oder Arzt anrufen. P302 + P352 + P333 + P313: BEI BERÜHRUNG MIT DER HAUT: Mit viel Wasser und Seife waschen. Bei Hautreizung oder -ausschlag: ärztlichen Rat einholen/ärztliche Hilfe hinzuziehen. P261: Einatmen von Staub vermeiden P304 + P340 + P312: BEI EINATMEN: Die betroffene Person an die frische Luft bringen und in einer Position ruhigstellen, die das Atmen erleichtert. Bei Unwohlsein Giftinformationszentrum oder Arzt anrufen.
Zement AG Klinkerstr. 4 D-12345 Zementhausen Tel +49 (9876) 54321 Fax +49 (9876) 54322	

Bild VI-4: Einstufung und Kennzeichnung von Portlandzementklinker nach CLP/GHS

Portlandzementklinker

Portlandzementklinker ist gemäß Anhang V der REACH-Verordnung von der Registrierungspflicht ausgenommen. Dadurch war es für die Zementunternehmen nicht erforderlich, ein aufwendiges Registrierungsdossier zu erstellen und dieses bei der europäischen Chemikalienagentur (ECHA) einzureichen. Allerdings war Portlandzementklinker als gefährlicher Stoff bis zum 03.01.2011 bei der europäischen Chemikalienagentur in dem neu geschaffenen Einstufungs- und Kennzeichnungsverzeichnis zu melden. Diese Meldung, auch als Notifizierung bezeichnet, wurde durch das CEMBUREAU für alle Zementhersteller gemeinschaftlich vorgenommen. In diesem Zusammenhang hat auch zukünftig jeder Hersteller die für die Einstufung und

damit für die Notifizierung erforderlichen Informationen zu den physikalischen, toxikologischen und ökotoxikologischen Gefahrenendpunkten, wie Prüfberichte, Veröffentlichungen etc., vorzuhalten.

REACH- und CLP-Verordnung verlangen für Stoffe eine Einstufung und Kennzeichnung gemäß dem Global Harmonisierten System (GHS) seit spätestens 01.12.2010. Eine entsprechende Einstufung und Kennzeichnung ist somit für Portlandzementklinker erforderlich. **Bild VI-4** zeigt die neue Kennzeichnung. Anstelle des bisherigen „Andreaskreuz“-Gefahrensymbols (mit Kennbuchstaben Xi) sind nun zwei Piktogramme für die Kennzeichnung nötig, das Piktogramm mit dem Ausrufezeichen und das Piktogramm mit dem Re-

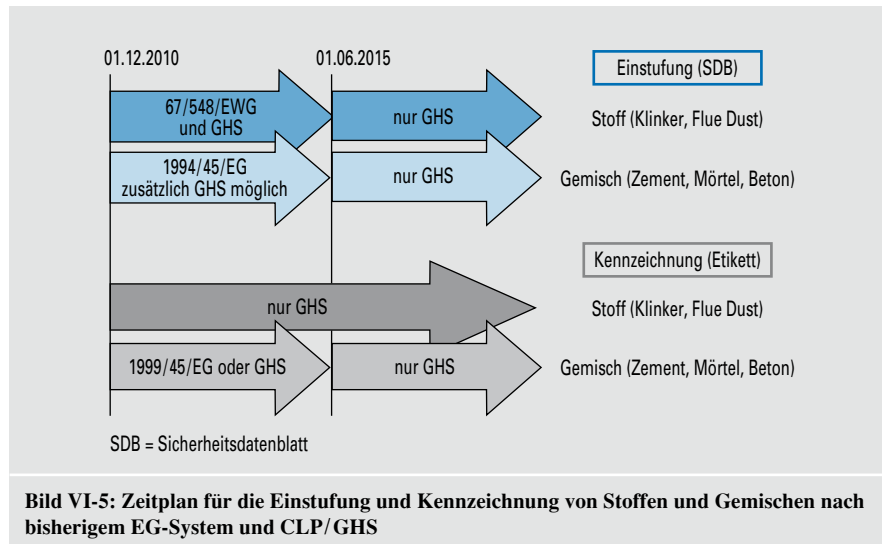
genzglas. Damit verbunden ist das Signalwort „Gefahr“. Die Gefahren werden durch H-Sätze (Hazard Statements) anstelle von R(Risiko)-Sätzen und die Sicherheitshinweise durch P-Sätze (Precautionary Statements) anstelle von S(Sicherheits)-Sätzen kommuniziert.

Darüber hinaus benötigt jeder Hersteller von Portlandzementklinker, sofern er diesen in Verkehr bringt, auch ein REACH- und CLP-konformes Sicherheitsdatenblatt. Ein vom VDZ erarbeitetes Muster steht hierfür bereits seit November 2010 zur Verfügung. Die aktuelle Fassung kann von der Homepage des VDZ abgerufen werden. Das VDZ-Muster basiert auf der von der CEMBUREAU-Expertengruppe „TF REACH-SDS-C&L“ erstellten Vorlage.

Flue dust

Die meisten deutschen Zementhersteller haben entsprechend der REACH-Verordnung Ende 2010 den Stoff Flue dust registriert. Die Registrierung erfolgte dabei gemeinsam durch ein Konsortium aus rund 80 europäischen Unternehmen. Bei der Bezeichnung Flue dust handelt es sich um den englischen Namen für Kaminstaub, der im europäischen Altstoffverzeichnis (EINECS) verwendet wird. Darunter sind alle Prozessstäube zusammengefasst, die bei der Zementklinkerherstellung anfallen können, beispielsweise Bypassstäube oder Filterstäube. Durch die Bandbreite der als Flue dust deklarierten Stäube kann dieser viele unterschiedliche Komponenten enthalten. Die wesentlichen Bestandteile sind die Portlandzementklinkerphasen, Calciumoxid, Kaliumchlorid und Alkalisulfate sowie Calciumcarbonat und andere Minerale aus dem Rohmehl. Für die Registrierung mussten die Hersteller die mineralogische Zusammensetzung ihres Flue dust genau kennen, um demonstrieren zu können, dass die Stoffgleichheitsanforderungen aus dem gemeinsamen Registrierungsdossier erfüllt sind. Für diesen Nachweis wurden Messdaten zur Phasenzusammensetzung und zur chemischen Zusammensetzung (Haupt- und Nebenelemente sowie Spurenelemente) benötigt, wobei die REACH-Verordnung keine Angaben über die Prüfhäufigkeit macht. Hierfür ist jeder Hersteller selbst verantwortlich.

Für das gemeinsame Registrierungsdossier mit dem integrierten Stoffsicherheitsbericht mussten außerdem Angaben zu zahlreichen physikalischen, toxikologischen und ökotoxikologischen Eigenschaften (so genannte Gefahrenendpunkte) bereitgestellt werden. Die erforderlichen Prüfungen



wurden durch das Konsortium beauftragt, finanziert und 2010 durchgeführt. Die für das Registrierungsdossier eingereichten Unterlagen wie Prüfberichte, Studien und Veröffentlichungen sind von jedem Registranten in seinem Unternehmen vorzuhalten und müssen bei Bedarf den Behördenvertretern im Rahmen einer REACH-Prüfung vorgelegt werden. Eine Prüfung des Registrierungsdossiers für Flue dust durch die ECHA und Vertreter aus den zuständigen Behörden der europäischen Länder findet 2012 statt. Dabei wird sich zeigen, ob die Registrierung erfolgreich zu Ende gebracht werden kann oder ob zusätzliche Prüfungen in Form von Tierversuchen erforderlich werden.

Die Einstufung und Kennzeichnung von Flue dust hat wie bei Portlandzementklinker gemäß CLP-Verordnung nach GHS zu erfolgen. Maßgeblich für die von den Prozessstäuben ausgehenden Gefahren sind die enthaltenen Zementklinkerphasen sowie Calciumoxid. Daraus ergibt sich für Flue dust eine Einstufung und Kennzeichnung mit den gleichen Gefahrenpiktogrammen sowie H- und P-Sätzen wie bei Portlandzementklinker.

Die Sicherheitsdatenblätter für Flue dust und für Portlandzementklinker unterscheiden sich jedoch wesentlich. Da Flue dust registriert wurde, muss das Sicherheitsdatenblatt neben dem üblichen allgemeinen Teil auch Expositionsszenarien enthalten. Diese sind im Stoffsicherheitsbericht des Registrierungsdossiers anzugeben. Dadurch hat sich der Umfang des Sicherheitsdatenblatts von etwa 10 auf rund 60 Seiten vergrößert. Ein VDZ-Mustersicherheitsdatenblatt, das sich am CEMBUREAU-Muster orientiert, steht auf der Homepage des VDZ zur Verfügung.

Zement

Zemente und andere zementhaltige Produkte sind so genannte Gemische. Gemäß REACH-Verordnung bedarf es für Gemische keiner Registrierung und keiner Notifizierung. Allerdings ist auch für Gemische ein neues, REACH-konformes Sicherheitsdatenblatt erforderlich. Die Kennzeichnung erfolgt derzeit noch nach der bisherigen Zubereitungsrichtlinie mit R- und S-Sätzen. Auf europäischer Ebene hat sich jedoch die Zementindustrie darauf verständigt, die Übergangsfrist, die für Mischungen besteht, nicht auszuschöpfen (s. Bild VI-5). Bis Mitte 2013 soll eine Umstellung der Kennzeichnung entsprechend dem GHS erfolgen. Diese Empfehlung wurde vom CEMBUREAU-Vorstand beschlossen. Die geänderte Kennzeichnung ist dann neben dem Sicherheitsdatenblatt auch auf der Verpackung anzuwenden. Der Termin Mitte 2013 wurde gewählt, weil zu diesem Zeitpunkt auch Änderungen aufgrund der aktualisierten Zementnorm EN 197-1 und der neuen Bauproduktenverordnung erforderlich werden. Alle Änderungen können dann gemeinsam in einem Vorgang umgesetzt werden. Zementhersteller brauchen die Sackaufdrucke somit nur einmal zu aktualisieren.

Die zukünftige CLP/GHS-Kennzeichnung von Zementen entspricht im Wesentlichen der CLP/GHS-Kennzeichnung von Portlandzementklinker. Sofern der Zement chromatoreduziert ist, fehlt nur der H-Satz H317 „Kann allergische Reaktionen hervorrufen“. Dies ist jedoch der Regelfall. Da für den Gehalt an wasserlöslichem Chromat die bisherige Beschränkungsregelung auch unter der REACH-Verordnung gilt, ist weiterhin eine entsprechende Kennzeichnung mit Wirksamkeitsdatum auf der Verpackung erforderlich.

Mitteilungspflicht für gefährliche Gemische nach Chemikaliengesetz

Bis zur Neufassung des Chemikaliengesetzes 2011 galt die Mitteilungspflicht gemäß §16 des Chemikaliengesetzes nur für bestimmte gefährliche Produkte, die für jedermann zugänglich in Verkehr gebracht wurden. Mit der Neufassung sind zum einen nun auch als reizend eingestufte Produkte betroffen und zum anderen gilt diese Verpflichtung unabhängig davon, ob das Produkt an gewerbliche oder private Endverbraucher abgegeben wird. Für die Erfüllung der Mitteilungspflicht gibt es in einer Übergangsphase zwei mögliche Vorgehensweisen. Die folgende Variante hat der VDZ seinen Mitgliedern per Rundschreiben empfohlen:

- Übermittlung der vorhandenen Sicherheitsdatenblätter an das Institut für Arbeitsschutz (IFA) bei der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) bis zum 01.05.2012 und
- Mitteilung gemäß § 16 e ChemG an das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR), sobald die Kennzeichnung der Produkte vom bisherigen System (Zubereitungsrichtlinie 1999/45/EG) auf das Global Harmonisierte System (GHS) gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 umgestellt wird, jedoch vor dem 01.07.2014.

Gefahrstoffverordnung

Seit Ende November 2010 gilt in Deutschland zusätzlich zur REACH- und CLP-Verordnung eine aktualisierte Fassung der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV). Der Grund hierfür liegt in zusätzlichen Aspekten, die die GefStoffV umfasst, nicht aber die beiden europäischen Verordnungen. So ist die Gefährdungsbeurteilung ein wesentlicher Punkt der Gefahrstoffverordnung. Dazu gehört, dass für jeden Arbeitsplatz, an dem mit Gefahrstoffen umgegangen wird, der Arbeitgeber eine Gefährdungsbeurteilung vorzunehmen hat. Danach ist festzulegen, welche Schutzmaßnahmen notwendig sind. Vom so genannten nachgeschalteten Anwender sind hierzu die in Sicherheitsdatenblättern und Expositionsszenarien aufgeführten Risikomanagementmaßnahmen für identifizierte Verwendungen als Vorgabe zu nutzen. Maßgeblich für die zu ergreifenden Risikominderungs- und Arbeitsschutzmaßnahmen ist letztendlich aber die Gefährdungsbeurteilung des Arbeitgebers. Er muss prüfen, ob die bei ihm durchgeführten Tätigkeiten durch das Sicherheitsdatenblatt und die darin beschriebenen Maßnahmen abgedeckt sind. Sollte eine Tätigkeit von den im Stoffsicherheitsbericht betrachteten und

Tafel VI-2: MAK-Werte und Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW)

	MAK-Wert	gültiger AGW, Ende 2011
Allgemeinstaub, alveolengängige Fraktion (A-Staub)	bis 2010: 3 mg/m ³ seit 2011: 0,3 mg/m ³	3 mg/m ³
Allgemeinstaub, einatembare Fraktion (E-Staub)	bis 2007: 10 mg/m ³ seit 2008: 4 mg/m ³	10 mg/m ³
Portlandzement-Staub, E-Fraktion	bis 2007: 10 mg/m ³ seit 2011: – ¹⁾	5 mg/m ³
Quarzfeinstaub, A-Fraktion	bis 2003: 0,15 mg/m ³ seit 2004: – ¹⁾	–

¹⁾ MAK-Wert zurückgezogen bzw. nicht vorhanden

durch Expositionsszenarien oder -kategorien beschriebenen identifizierten Verwendungen abweichen, muss er als nachgeschalteter Anwender neben seiner Gefährdungsbeurteilung gegebenenfalls auch zusätzliche Pflichten nach REACH erfüllen. Hierzu kann z. B. die Erstellung eines Stoffsicherheitsberichts für die bei ihm erfolgenden Verwendungen gehören.

TRGS 559 Mineralischer Staub

Die 2010 veröffentlichte TRGS 559 gilt dem Schutz von Beschäftigten und anderen Personen bei Tätigkeiten, bei denen mineralischer Staub auftreten kann, insbesondere wenn Quarzfeinstaubanteile vorhanden sind. Die TRGS enthält Vorgaben für die vom Arbeitgeber durchzuführende Gefährdungsbeurteilung bei Arbeitsplätzen mit möglicher Staubexposition. Neben der tatsächlichen Staubexposition sind die in Deutschland gültigen Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW) für die Gefährdungsbeurteilung maßgeblich. Für Staub, der keine krebserzeugende, fibrogene (organschädigende), allergisierende oder toxische Wirkung aufweist, gelten die in **Tafel VI-2** aufgeführten Grenzwerte.

Zur Beurteilung der Staubexposition versteht die TRGS 559 auf das Staubungsverhalten, das nach DIN EN 1505 anhand der mit zwei Verfahren messbaren Staubungszahlen in vier Staubklassen, von staubarm bis stark staubend, unterteilt werden kann. Die Staubungszahl ist der Quotient aus der jeweiligen im Staubungsversuch freigesetzten alveolengängigen oder einatembaren Staubmasse in mg und der Masse des eingesetzten Materials in kg. Obwohl von Zementen bisher noch keine Staubungszahlen bestimmt wurden, kann aufgrund der Erfahrungen angenommen werden, dass Zemente als stark staubend gelten. Bisher gibt es keine Verpflichtung, die Staubungszahlen eines pulverförmigen Produktes zu ermitteln und an Kunden weiterzugeben. Die TRGS 559, Absatz 4.1 „Ersatzstoffe und Ersatzverfahren“ sieht jedoch vor, dass vor der Aufnahme von Tä-

tigkeiten mit Materialien, aus denen mineralischer Staub freigesetzt werden kann, zu prüfen ist, ob durch Änderung des Arbeitsverfahrens das Auftreten von Staub verhindert oder vermindert werden kann. Mit diesen Zusammenhängen beschäftigen sich aktuell auch eine Arbeitsgruppe bei der GISBAU und ein Gesprächskreis bei der BG BAU. Hier treffen sich Vertreter der Berufsgenossenschaften, der Behörden und der Industrie (BBS, DBC, IWM, VDZ etc.), um über praktikable Maßnahmen zur Umsetzung der TRGS 559 zu diskutieren.

Neue MAK-Werte

Kritisch verfolgt die Zementindustrie die 2011 von der DFG-Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe geänderten MAK-Werte für Allgeminstaub und Portlandzementstaub. Der bisherige MAK-Wert für den alveolengängigen Anteil am Allgeminstaub (A-Staub) von 3 mg/m³ wurde durch einen neuen Wert ersetzt. Es handelt sich hierbei um einen Wert für alveolengängige granuläre biogene Stäube von 0,3 mg/m³. Es wird damit gerechnet, dass dieser neue MAK-Wert 2012 durch den Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) den Status eines neuen Arbeitsplatzgrenzwerts erhält. Für anorganische Partikel wird dieser dann möglicherweise bei 0,75 mg/m³ liegen und somit um einen Faktor 4 niedriger als der bisherige Arbeitsplatzgrenzwert. Voraussichtlich wird gleichzeitig auch der Arbeitsplatzgrenzwert für den einatembaren Allgeminstaub (E-Staub) von 10 mg/m³ auf 4 mg/m³ herabgesetzt.

Für Portlandzementstaub hat die Senatskommission den bisherigen MAK-Wert sogar zurückgezogen, da sie Portlandzementstaub nun als potenziell krebserzeugend (Stufe 3B) eingestuft hat. Der VDZ hat hierzu Ende 2011 bei der Senatskommission eine schriftliche Stellungnahme eingereicht. Darin wird auf die Untersuchungsergebnisse der so genannten CEM-BUREAU-Studien zu den gesundheitlichen Auswirkungen von Zement verwie-

sen. Danach ist eine Einstufung als potenziell krebserzeugend nicht nachvollziehbar. Die weitere Entwicklung ist jedoch noch unklar. Es wird allerdings nicht damit gerechnet, dass die von der Senatskommission vorgenommene Einstufung bereits in 2012 oder 2013 durch den AGS in eine rechtlich gültige Einstufung überführt wird.

Quarzfeinstaub

Schon seit vielen Jahren steht Quarzfeinstaub im Verdacht krebserregend zu sein. Daher hat das Thema Quarzfeinstaubexposition einen hohen Stellenwert. Schon heute gelten gemäß TRGS 906 Tätigkeiten oder Verfahren, bei denen Beschäftigte alveolengängigen Stäuben aus kristallinem Siliziumdioxid in Form von Quarz und Cristobalit ausgesetzt sind, als krebserzeugend. Da in Deutschland kein Arbeitsplatzgrenzwert für Quarzfeinstaub existiert, gilt allein das Minimierungsgebot. Einen solchen Ansatz verfolgt auch das Europäische Sozialübereinkommen zu kristalliner Kieselsäure (kurz NePSi). Hier soll durch die Umsetzung von bester und bewährter Technik sowie durch ein verbessertes Bewusstsein (z. B. durch Schulung der Arbeitnehmer) die Quarzfeinstaubexposition am Arbeitsplatz minimiert werden. Alle zwei Jahre findet eine Berichtsphase statt, bei der überprüft werden soll, inwieweit Maßnahmen zur Expositionsminimierung, Schulung und gesundheitlichen Überwachung in den Unternehmen umgesetzt wurden. Mit einer Beteiligungsquote von nahezu 100 % auf europäischer Ebene in 2010 gilt die Zementbranche als vorbildlich. Da aber nicht alle Industriebranchen an NePSi aktiv teilnehmen, besteht von einigen Sozialpartnern weiterhin die Forderung nach einem einheitlichen europäischen Arbeitsplatzgrenzwert oder der offiziellen Einstufung als krebserzeugend.

Eine Einstufung von Quarzfeinstaub als krebserzeugend ist jedoch mehr als umstritten. Zwar ist bekannt, dass ein erhöhtes Risiko für Silicoseerkrankungen durch eine wiederholte Quarzfeinstaubexposition besteht, nicht aber für Krebserkrankungen. Vor diesem Hintergrund hat der europäische Industriemineralverband (IMA-Europe) für quarzfeinstaubhaltige Produkte eine neue CLP/GHS-Einstufung und Kennzeichnung eingeführt. Gemäß dieser Selbsteinstufung werden Quarzfeinstäube und Produkte, die mehr als 10 M.-% Quarzfeinstaub enthalten, als STOT RE 1 und Produkte mit einem Quarzfeinstaubanteil von 1 bis 10 M.-% als STOT RE 2 eingestuft. STOT steht für spezifische Zielorgan-toxizität (specific target organ toxicity) und

RE 1 bzw. RE 2 für wiederholte Exposition (repeated exposure) der Kategorie 1 bzw. 2. Für eine Anwendung dieser Einstufung muss demnach der Quarzfeinstaubgehalt des Produkts bekannt sein. Eine Bestimmungsmethode hierfür ist die SWeRF-Methode (Size-weighted Respirable Fraction). Anhand der Phasenanalyse und der Korngrößenverteilung lässt sich der alveolengängige Quarzanteil berechnen. Zahlreiche Messungen an Portland-, Portlandkalkstein- und anderen Normalzementen aus den VDZ-Mitgliedswerken haben gezeigt, dass die Quarzfeinstaubanteile weniger als ein Prozent betragen. Eine zusätzliche STOT RE-Einstufung ist somit für Zemente und andere zementhaltige Produkte in der Regel nicht erforderlich.

Europäische Bauproduktenrichtlinie / -verordnung ■

Sowohl die europäische Bauproduktenrichtlinie (BPR) als auch die am 04.04.2011 veröffentlichte rechtsverbindliche Bauproduktenverordnung (BPV), die die bisherige BPR ersetzt, nehmen gezielt Bezug auf die Hygiene, die Gesundheit und die Umwelt. Da jedoch zurzeit nur zwei Mitgliedsstaaten der Europäischen Union, die Niederlande und Deutschland, quantitative Anforderungen an die Umweltverträglichkeit von Bauprodukten in Kontakt mit Boden und Grundwasser stellen, enthalten die bisher verabschiedeten harmonisierten europäischen Produktnormen nur allgemeine Hinweise auf bestehende nationale Anforderungen.

Für die zukünftige Aus- und Überarbeitung harmonisierter technischer Spezifikationen (harmonisierte europäische Normen oder europäische technische Zulassungen) sollen nun entsprechende Bewertungsmethoden ausgearbeitet werden. Dazu hat die Europäische Kommission am 16.03.2005 das Mandat M/366 „Entwicklung horizontaler genormter Bewertungsmethoden für harmonisierte Konzepte zu gefährlichen Stoffen gemäß der Bauproduktenrichtlinie – Emissionen in Raumluft, Boden, Oberflächenwasser und Grundwasser“ erteilt. Das Mandat sieht die Erarbeitung horizontaler Prüf- und Bewertungsverfahren durch das Europäische Komitee für Normung (CEN) vor, während die konkreten Anforderungen an die Bauprodukte weiterhin national von den einzelnen Mitgliedsstaaten festgelegt werden.

Normungsarbeiten im CEN/TC 351

Zur Bereitstellung der notwendigen generischen, horizontalen Prüf- und Bewertungsverfahren zur Umsetzung des Man-

dats M/366 hat das CEN im Jahr 2006 das Technische Komitee CEN/TC 351 „Bauprodukte: Bewertung der Freisetzung gefährlicher Substanzen“ gegründet. Entsprechend den unterschiedlichen Nutzungsbedingungen wurden unterhalb des TCs zunächst die beiden folgenden Arbeitsgruppen eingerichtet:

- Arbeitsgruppe 1: Freisetzung in Boden und Grund-/Oberflächenwasser
- Arbeitsgruppe 2: Emissionen aus Bauprodukten in die Innenraumluft

Mittlerweile wurden drei weitere Arbeitsgruppen gegründet:

- Arbeitsgruppe 3: Radioaktivität
- Arbeitsgruppe 4: Terminologie
- Arbeitsgruppe 5: Gehaltsbestimmung

Das Hauptergebnis der Arbeit des CEN/TC 351 in den letzten Jahren sind drei Entwürfe für harmonisierte Prüfnormen. Zwei dieser Prüfnormen sind für die Bestimmung der Auslaugung anorganischer und organischer Substanzen aus Bauprodukten vorgesehen. Die dritte Prüfmethode behandelt die Freisetzung flüchtiger Verbindungen in die Innenraumluft. Sie soll für alle emissionsrelevanten Bauprodukte anwendbar sein, für rein anorganische zementgebundene Baustoffe hat sie jedoch nur eine untergeordnete Bedeutung.

Um das grundsätzlich unterschiedliche Auslaugverhalten körniger und monolithischer Bauprodukte zu berücksichtigen, hat die Arbeitsgruppe 1 einen Standtest „Generic horizontal dynamic surface leaching test (DSLTL) for determination of surface dependent release of substances from monolithic or plate-like or sheet-like construction products“ und einen Säulentest „Generic horizontal up-flow percolation test for determination of the release of substances from granular construction products“ ausgearbeitet (**Bild VI-6**). Bevor die vom CEN/TC 351 erstellten Prüfmethoden den Status von Europäischen Normen (EN) erlangen können, sind noch Robustheitsprüfungen und als zweiter Validierungsschritt Ringversuche erforderlich.

Das Ziel der Robustheitsprüfungen ist es, durch die Variation ausgewählter Prüfparameter zu ermitteln, wie empfindlich die Prüfmethode auf Änderungen der Prüfverhältnisse reagiert. Nach den Robustheitsprüfungen werden die Normentwürfe ggf. entsprechend den Versuchsergebnissen angepasst und als Technische Spezifikation (TS) veröffentlicht. Zurzeit werden von einem europäischen Konsortium Robust-

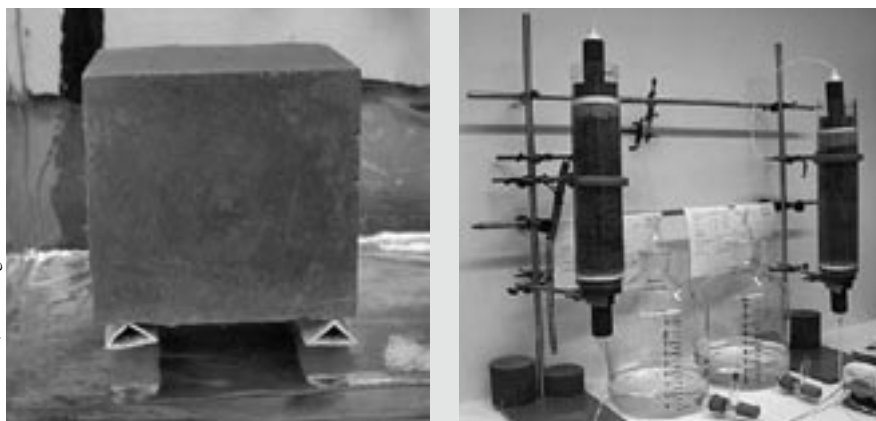


Bild VI-6: Betonwürfel im Langzeitstandtest (links); körniges Bauprodukt im Säulentest (rechts)

Tafel VI-3: Variation der Prüfbedingungen bei den Betonversuchen

Variation Nr.	Beschreibung
1	Verringerung der Vorlagerungszeit auf 28 Tage
2	Verlängerung der Vorlagerungszeit auf 91 Tage
3	Verringerung der Prüftemperatur auf 15 °C
4	Erhöhung der Prüftemperatur auf 25 °C
5	Kontaktzeiten entsprechend dem DAfStb-Langzeitstandtest
6	Kontaktzeiten entsprechend der niederländischen Norm NEN 7375
7	Verringerung des Verhältnisses vom Volumen des Eluenten zur Oberfläche des Prüfkörpers auf 40 l/m ²
8	Erhöhung des Verhältnisses vom Volumen des Eluenten zur Oberfläche des Prüfkörpers auf 120 l/m ²
9	Verringerung des pH-Werts des Ausgangsprüfwassers auf einen Wert von 4
10	Erhöhung des pH-Werts des Ausgangsprüfwassers auf einen Wert von 10

Tafel VI-4: Relative Standardabweichungen (Variationskoeffizient V) bei den Achtfachbestimmungen für alle untersuchten Parameter

Parameter	Relative Standardabweichung (Variationskoeffizient V) in %
Barium (Ba)	36,30
Blei (Pb)	19,80
Chlorid (Cl ⁻)	89,60
Chrom (Cr)	17,20
Kalium (K)	6,86
Kupfer (Cu)	56,60
Natrium (Na)	14,40
Selen (Se)	7,16
Sulfat (SO ₄ ²⁻)	33,80
Vanadium (V)	6,55
Zink (Zn)	34,90

heitsprüfungen für den Stand- und Säulentest für eine Vielzahl unterschiedlicher Bauprodukte durchgeführt. Wenn die Versuchsergebnisse vorliegen und die Abstimmungen im CEN positiv verlaufen, könnten die Normentwürfe im Jahr 2013 als veröf-

fentlichte Technische Spezifikationen verfügbar sein.

Mörtel und Beton wurden von dem europäischen Konsortium nicht untersucht, da vom Umweltbundesamt (UBA) im Jahr 2009 – als die Finanzierung dieser Validierungsuntersuchungen durch die Europäische Kommission noch nicht feststand – ein entsprechendes Forschungsvorhaben an den Verein Deutscher Zementwerke gemeinsam mit dem Institut für Bauforschung der RWTH Aachen vergeben wurde, um den Validierungsprozess zu fördern. Ziel des Projektes, das in Abstimmung mit dem CEN/TC 351 erfolgte, war es, die Robustheitsprüfungen für den Standtest mit Mörteln und Betonen durchzuführen. Für die Mörtelprüfungen wurde ein mineralischer Armierungsputz mit einem hohen Anteil organischer Bestandteile eingesetzt, um zusätzlich die Eignung des Standtests für die Untersuchung der Abgabe organischer Substanzen (TOC-Freisetzung) festzustellen. Die Mörtel und Betone wurden in Anlehnung an die DIBt-Grundsätze hergestellt und gelagert. Als Prüfkörper wurden in bei-

den Fällen Würfel mit der Abmessung 10 cm x 10 cm x 10 cm vorgesehen.

Bei den Betonversuchen wurde der Standtest zunächst entsprechend dem europäischen Normentwurf (DSLt, 36 Tage-Langzeitstandtest) als Achtfachbestimmung durchgeführt. Danach wurden die Prüfbedingungen gemäß **Tafel VI-3** variiert. Diese Untersuchungen erfolgten jeweils als Doppelbestimmung. Die gewonnenen Eluate wurden entsprechend den DIBt-Grundsätzen hinsichtlich der anorganischen Parameter untersucht, für die ein Geringfügigkeitsschwellenwert definiert ist. Daneben wurden die Natrium- und Kaliumkonzentrationen sowie der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit in den Eluaten ermittelt. Für den Armierungsputz wurde zusätzlich auch die TOC-Freisetzung untersucht.

Die Ergebnisse der Achtfachbestimmung für Kalium und Natrium, also für Elemente, die in größeren Mengen und weitgehend gelöst im Porenwasser vorliegen und deren Auslaugung im Wesentlichen diffusionskontrolliert erfolgt, zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. Dagegen treten für einige Spurenelemente und Anionen teilweise größere Streuungen auf. Diese relativ große Bandbreite der Ergebnisse ist darauf zurückzuführen, dass in den meisten Fällen nur sehr geringe Substanzmengen ausgelaugt werden, die häufig in der Nähe oder unterhalb der Bestimmungsgrenze der eingesetzten sehr empfindlichen Analysemethoden liegen. In **Tafel VI-4** sind die relativen Standardabweichungen (Variationskoeffizient V) der kumulierten Freisetzungsmengen bei der Achtfachbestimmung für alle untersuchten Parameter zusammengefasst. Diese Variationskoeffizienten haben eine Größenordnung, die auch in Studien anderer Autoren ermittelt wurden.

Bild VI-7 zeigt exemplarisch den zeitlichen Verlauf der kumulierten Natriumfreisetzung aus Beton bei der Variation der Prüfbedingungen entsprechend **Tafel VI-3**, einschließlich des Mittelwerts der Achtfachbestimmung. Bei den Mörtelprüfungen wurden nur die Prüfbedingungen variiert, die bei den Betonversuchen den größten Einfluss gezeigt hatten, und die DSLt-Prüfung wurde nur als Doppelbestimmung ausgeführt. Die Auslaugergebnisse für den Armierungsputz bestätigen die Ergebnisse der Betonuntersuchungen. Die kumulierten Freisetzungen für die untersuchten Parameter liegen in der gleichen Größenordnung. **Bild VI-8** zeigt den zeitlichen Verlauf der kumulierten TOC-Freisetzung aus dem Armierungsputz bei der Variation der

Prüfbedingungen, einschließlich des Mittelwerts der Doppelbestimmung.

Die Ergebnisse für die Kalium-, die Natrium- und TOC-Auslaugung zeigen, dass sich für diese Parameter nur eine geringe Streubreite bei der Variation der Prüfbedingungen ergibt. Daraus kann geschlossen werden, dass der Standtest (DSLST) an sich robust ist und dass er auch für die Untersuchung der Abgabe organischer Substanzen geeignet ist. Ein weiteres wesentliches Resultat des Forschungsvorhabens ist, dass die Auslaugergebnisse für die vorgenannten Parameter, die entsprechend der niederländischen Norm NEN 7375 und dem DAfStb-Langzeitstandtest erhalten wurden, in etwa in der Mitte des Streubereichs aller durchgeführten Versuchsvarianten liegen. Dies zeigt, dass eine Übertragung entsprechender vorliegender Ergebnisse auf den 36-Tage-Standtest gemäß dem europäischen Normentwurf (DSLST) relativ einfach möglich sein sollte.

Aus den Untersuchungsergebnissen kann weiterhin gefolgert werden, dass keine Änderungen des europäischen Normentwurfs (DSLST) hinsichtlich der zulässigen Spannbreiten der vorgesehenen Prüfbedingungen erforderlich sind. Der umfassende Abschlussbericht zu dem Forschungsvorhaben mit allen Untersuchungsergebnissen wurde vom Umweltbundesamt in elektronischer Form veröffentlicht und ist als Download unter <http://www.uba.de/uba-info-medien/4153.html> verfügbar.

Auswirkungen auf Zement und zementgebundene Bauprodukte

Die Normungsarbeiten im CEN/TC 351 zu den Prüfverfahren schreiten zügig voran. Sofern die Europäische Kommission und weitere Stakeholder, wie die Mitgliedsstaaten und die Industrie, die Mittel zur Finanzierung der notwendigen Ringversuche rechtzeitig bereitstellen, ist die Veröffentlichung der ersten drei Prüfnormen des CEN/TC 351 als harmonisierte Europäische Normen in den Jahren 2015/2016 möglich. Die Umsetzung des gesamten Konzepts des Mandats M/366, einschließlich der notwendigen Bewertungsverfahren und der gesetzlichen Anforderungen, wird jedoch noch etliche Jahre in Anspruch nehmen. Das Forschungsinstitut der Zementindustrie ist in den maßgeblichen Gremien vertreten und bringt die günstigen Erfahrungen zu Zement und Beton, die sich seit Jahrzehnten für Bauteile in Kontakt mit Boden, Oberflächen-, Grund- und Trinkwasser bewährt haben, in die Normungsarbeiten ein. So arbeitet die Europäische Beton-Plattform zurzeit an einem Dossier

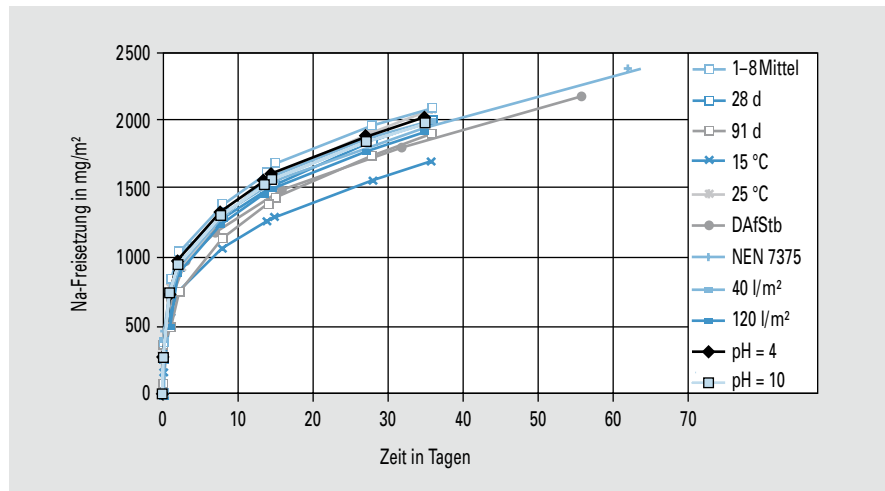


Bild VI-7: Zeitlicher Verlauf der kumulierten Natriumfreisetzung aus Beton bei der Variation der Prüfbedingungen entsprechend Tafel VI-3 einschließlich des Mittelwerts der Achtfachbestimmung

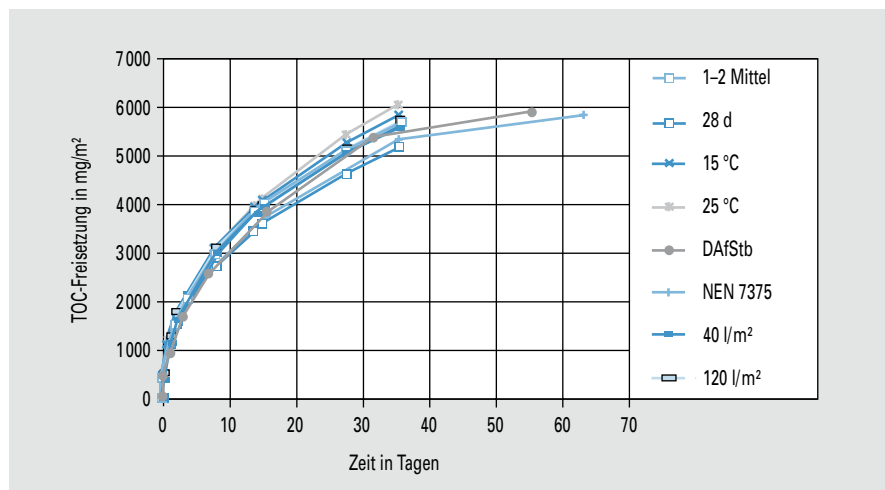


Bild VI-8: Zeitlicher Verlauf der kumulierten TOC-Freisetzung aus dem Armierungsputz bei der Variation der Prüfbedingungen entsprechend Tafel VI-3 einschließlich des Mittelwerts der Doppelbestimmung

für Beton, das auf der Basis vorliegender wissenschaftlich abgesicherter Untersuchungsergebnisse gewährleisten soll, dass Zemente nach EN 197 und Beton nach EN 206 weiterhin möglichst ohne gesonderte Umweltprüfungen zur Herstellung von Bauprodukten oder Bauteilen in Kontakt mit Boden, Oberflächen- und Grundwasser eingesetzt werden können.

DIBt-Merkblatt: Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser ■

In Deutschland erfüllen genormte oder bauaufsichtlich zugelassene Bauprodukte alle Anforderungen des Umweltschutzes. Für neue, unbekannte Bauprodukte, die einer bauaufsichtlichen Zulassung bedürfen,

müssen hingegen zum Teil auch mögliche Boden- und Grundwassergefährdungen berücksichtigt werden. Die Grundsätze zur „Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) fassen dazu die wissenschaftlichen, technischen und rechtlichen Grundlagen zusammen. Die Grundsätze gliedern sich in drei Teile. In Teil I wird das Konzept zur Bewertung von Bauprodukten hinsichtlich der Besorgnis einer schädlichen Boden- oder Grundwasserveränderung beschrieben. Dieses allgemeine Konzept gilt für alle Bauprodukte und wurde erstmalig in der Fassung November 2000 veröffentlicht. In Teil II wird das Bewertungskonzept für ausgewählte Bauprodukte durch entsprechende DIBt-Projektgruppen konkretisiert, um die stoffspezifischen Eigenschaften der verschiedenen Bauprodukte sachgerecht zu

berücksichtigen. In Teil III sind die Analyseverfahren zusammengefasst, die bei einer Bewertung von Bauprodukten nach Teil I und Teil II verwendet werden sollen.

Für Beton und Betonausgangsstoffe wurde von der zuständigen Projektgruppe ein Bewertungsmodell entwickelt, mit dem die Ergebnisse von Laboruntersuchungen (DAfStb-Richtlinie: Bestimmung der Freisetzung anorganischer Stoffe durch Auslaugung aus zementgebundenen Baustoffen) auf Grundwasserbelastungen in der unmittelbaren Umgebung eines Bauwerkes übertragen werden können. Die anhand des Modells für definierte Randbedingungen berechneten Stoffkonzentrationen im Grundwasser müssen die vorgegebenen Grenzwerte (Geringfügigkeitsschwellenwerte, GFS-Werte) einhalten. Untersuchungen des Forschungsinstituts der Zementindustrie an Betonen, für deren Herstellung gezielt Zemente mit hohen Spurenelementgehalten eingesetzt wurden, hatten gezeigt, dass diese Anforderungen erfüllt werden. Allerdings war der Abstand zu den GFS-Werten für einige Spurenelemente nur gering.

Der allgemeine Teil I und der spezielle Teil II für Beton und Betonausgangsstoffe wurden 2006 europäisch notifiziert. Die Inhalte dieser beiden Teile wurden bereits in den letzten Tätigkeitsberichten ausführlich vorgestellt und diskutiert. Für Beton und Betonausgangsstoffe haben sich im Berichtszeitraum keine Änderungen ergeben. Der Teil II ist jedoch inzwischen um Schleierinjektionen und Kanalrohrsanierungsmittel erweitert worden. Die überarbeitete Fassung wurde 2011 europäisch notifiziert und kann im Internet über das „Technical Regulation Information System“ (TRIS) der Europäischen Kommission abgerufen werden.

Weiterhin befasst sich seit 2012 die DIBt-Projektgruppe „Modellierung: Dach und Fassaden“ mit der Ableitung eines Bewertungsmodells für berechnete Bauteile, wie zum Beispiel Betonsteindächer, Metaldächer oder Außenputze. Diese Arbeiten werden noch eine geraume Zeit in Anspruch nehmen. Das DIBt hat als Zielgröße für das Gesamtkonzept das Jahr 2019 anvisiert.

Zementgebundene Werkstoffe im Trinkwasserbereich ■

Europäische Aktivitäten

Trinkwasser ist das wichtigste Lebensmittel. Deshalb dürfen für Werkstoffe, die mit

Trinkwasser in Kontakt kommen, nur Materialien verwendet werden, die die Trinkwasserqualität nicht unzulässig beeinflussen. Zementgebundene Werkstoffe haben sich in allen Bereichen der Trinkwasserversorgung seit Jahrzehnten bewährt. Die europäische Trinkwasserverordnung legt für alle Mitgliedsstaaten der EU die Mindestanforderungen an das Trinkwasser fest. Daher schien es nahe liegend, auch die hygienischen Anforderungen an Werkstoffe in Kontakt mit Trinkwasser europäisch zu harmonisieren. Dazu arbeiteten in den Jahren 1999 bis 2004 von den Mitgliedsstaaten autorisierte Trinkwasserhygieniker in der so genannten Regulators Group an einem einheitlichen europäischen Zulassungssystem „European Acceptance Scheme“ (EAS). Das EAS sollte für alle Werkstoffe gelten, die in Kontakt mit Trinkwasser kommen, und sicherstellen, dass die vorhandenen Verbraucherschutzniveaus erhalten bleiben und alle bewährten Werkstoffe weiterhin ohne Einschränkung eingesetzt werden können.

Im Jahr 2004 wurden die Aktivitäten der Regulators Group gestoppt, da durch die EU-Kommission festgestellt wurde, dass die Bauproduktenrichtlinie „Construction Products Directive“ (CPD) keine rechtliche Basis für eine derartige Gruppe vorsieht. Deshalb wurde die Regulatorengruppe in eine Expertengruppe umgestuft, die keine Regelungs- oder Entscheidungsbefugnis besitzt, sondern lediglich die Kommission beraten soll. Weiterhin wurde klargestellt, dass die CPD nur Bauprodukte erfasst, die einer harmonisierten Technischen Spezifikation entsprechen, und dass die Anforderungen an diese Produkte den einzelnen Mitgliedsstaaten überlassen bleiben. Dies führte zu dem so genannten CPD-EAS.

Im Jahr 2007 wurden auch die Arbeiten zu dem CPD-EAS eingestellt. Seitdem beraten Trinkwasserregulatoren aus Frankreich, Großbritannien, den Niederlanden und Deutschland in der so genannten 4 Member-States-Group (4MS) darüber, wie die europäischen Arbeiten weitergeführt werden können. Ziel dieser Aktivitäten ist die gegenseitige Anerkennung von Prüfergebnissen auf freiwilliger Basis. Im Januar 2011 wurde dazu eine Absichtserklärung „Declaration of Intent“ von autorisierten Vertretern der 4 Mitgliedsstaaten unterzeichnet.

Die Arbeiten der 4MS für Metalle und Kunststoffe sind bereits relativ weit fortgeschritten. Seit Februar 2012 liegt auch ein Berichtsentwurf für die Bewertung zementgebundener Produkte in Kontakt

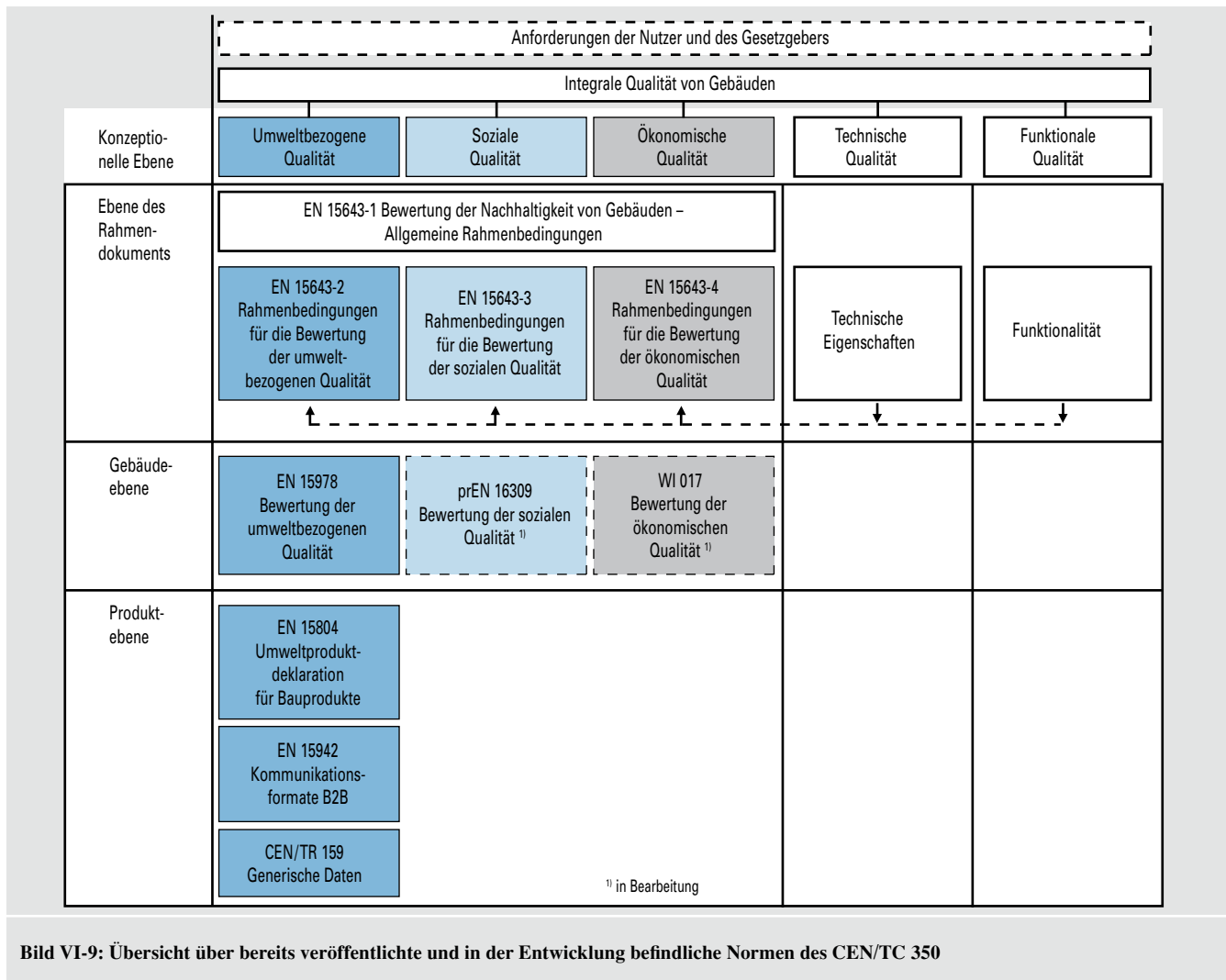
mit Trinkwasser vor. Dieser Entwurf sieht vor, dass zum jetzigen Zeitpunkt nur werkseitig hergestellte Produkte und Fertigprodukte für baustellenseitige Anwendungen bewertet werden. Die Bewertung soll nach dem Konformitätsbescheinigungsverfahren 1+ erfolgen, dabei werden Anforderungen an die folgenden Parameter gestellt:

- Vollständige Beschreibung der Zusammensetzung
- Übereinstimmung mit der Trinkwasserpositivliste (organische Substanzen)
- Organoleptische Parameter
- Migration von Metallen
- Migration organischer Substanzen (TOC-Bestimmung)
- Migration spezifischer organischer Substanzen
- GC/MS-Screening (falls von der Zulassungsstelle gefordert)
- Mikrobielles Wachstum

Diese umfangreichen Prüfungen können deutlich reduziert werden, wenn für alle Ausgangsstoffe entsprechende Zertifikate vorliegen. In diesem Fall sind nur die organoleptischen Parameter und die TOC-Freisetzung des Endprodukts zu ermitteln. Weiterhin ist vorgesehen, dass die Metallmigration nicht geprüft werden muss, wenn der Zement und Zusatzstoffe bestimmte Spurenelementgehalte nicht überschreiten. Für welche Spurenelemente Gehaltswerte festgelegt werden und wie hoch diese sind, soll in diesem Jahr durch entsprechende Migrationsversuche geklärt werden. Das Forschungsinstitut der Zementindustrie ist maßgeblich in diese Untersuchungen eingebunden.

DVGW-Arbeitsblatt W 347

Das Arbeitsblatt W 347 „Hygienische Anforderungen an zementgebundene Werkstoffe im Trinkwasserbereich – Prüfung und Bewertung“ der Deutschen Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) legt die Anforderungen an zementgebundene Werkstoffe fest, die direkt oder indirekt mit Trinkwasser oder Rohwasser für die Trinkwassergewinnung in Kontakt kommen. Mit der Ausgabe Mai 2006 des Arbeitsblatts wurden Anpassungen an den Stand der Technik und die relevanten europäischen Testmethoden vorgenommen. Im Berichtszeitraum haben sich keine Änderungen des Arbeitsblatts ergeben. Es war allerdings vorgesehen, die Positivliste des Arbeitsblatts zukünftig durch den DVGW-Projektkreis 3.4.12 „W 347“ zu diskutieren und die ergänzte Liste im Internet zu veröffentlichen. Gegen diese Vorgehensweise hat die für den



Trinkwasserbereich zuständige Stelle des Umweltbundesamts (UBA) Einspruch erhoben, da die Führung der Positivliste ihre hoheitliche Aufgabe sei. Gleichzeitig wurde jedoch auch festgestellt, dass das UBA zurzeit keine personellen Kapazitäten hat, die Positivliste zu führen. Das bedeutet, dass keine neuen Stoffe in die Positivliste aufgenommen werden können. Diese Situation ist für die betroffenen Industrien, insbesondere die Firmen der Bauchemie, nicht hinnehmbar. Es bleibt zu hoffen, dass hier schnellstmöglich eine für alle Parteien akzeptable Lösung gefunden wird.

Auf Beschluss des DVGW-Lenkungsgremiums wird das Arbeitsblatt W 347 jetzt überarbeitet. Dabei soll die Positivliste aus dem Arbeitsblatt herausgelöst und formal vom UBA zur Weiterführung übernommen werden.

Nachhaltiges Bauen ■

In einer nachhaltigen Entwicklung werden die Bedürfnisse der gegenwärtigen Generation zufrieden gestellt, ohne die Lebenschancen künftiger Generationen zu gefähr-

den. Diesem Leitbild folgt das Bauwesen, wenn funktionsgerechte Bauwerke mit geringen Kosten und geringen Belastungen für die Umwelt erstellt und auf Dauer genutzt werden.

Normung zum Nachhaltigen Bauen

Die europäische Normungsorganisation CEN hat in den letzten Jahren im Technischen Komitee CEN/TC 350 „Nachhaltigkeit von Gebäuden“ Normen zur Nachhaltigkeitsbewertung von Bauwerken erarbeitet. Über die internationale Zusammenarbeit mit dem CEMBUREAU war der VDZ an der Entwicklung dieser Normen beteiligt. **Bild VI-9** zeigt eine Übersicht der bereits veröffentlichten Normen und der Normen, die sich noch in der Entwicklung befinden.

In eine Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden nach den von CEN/TC 350 entwickelten Normen werden alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit (umweltbezogen, sozial und ökonomisch) einbezogen, dabei ist der gesamte Lebenszyklus eines Gebäudes zu betrachten. Technische und funktionale Anforderungen an ein Gebäu-

de sind in der Regel vor einer Nachhaltigkeitsbewertung zu definieren, da sie das Ergebnis der Bewertung beeinflussen. Einige der hierbei relevanten Eigenschaften (Brandschutz, Schallschutz etc.) werden auch bei der Bewertung der sozialen Qualität eines Gebäudes berücksichtigt. In den so genannten Rahmendokumenten werden allgemeine Grundsätze sowie Indikatoren für die Bewertung der umweltbezogenen, sozialen und ökonomischen Qualität definiert (s. **Bild VI-10**), während Bewertungsnormen die Methoden zur Bewertung dieser Indikatoren vorgeben. Für die umweltbezogene Qualität wurden darüber hinaus Normen entwickelt, nach denen Bauprodukterhersteller Umweltinformationen zu ihren Produkten zur Verfügung stellen sollen, damit diese für eine Nachhaltigkeitsbewertung auf Gebäudeebene herangezogen werden können (siehe folgender Abschnitt „Umweltproduktdeklaration“). Vergleiche hinsichtlich der Nachhaltigkeit sind auf Produktebene nicht sinnvoll, sondern können nur auf der Ebene eines „funktionellen Äquivalents“, also eines Gebäudes oder Gebäudeteils erfolgen.

Indikatoren für die Bewertung der umweltbezogenen Qualität (Beispiele):

- Treibhauspotenzial
- Versauerung von Boden- und Wasserressourcen
- Eutrophierung
- Bildung von bodennahem Ozon
- Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht
- Potenzial für den abiotischen Ressourcenabbau
- Einsatz von Primärenergie

Indikatoren für die Bewertung der ökonomischen Qualität:

- Lebenszykluskosten
- Kapitalwert (Erlös abz. Kosten)

Indikatoren für die Bewertung der sozialen Qualität:

- Zugänglichkeit
- Anpassungsfähigkeit
- Gesundheit und Behaglichkeit
- Belastungen für die Nachbarschaft
- Instandhaltung
- Sicherheit/Schutz

Bild VI-10: Indikatoren für die Nachhaltigkeitsbewertung nach den Normen des CEN/TC 350

Die von CEN/TC 350 entwickelten Normen enthalten keine Mindestanforderungen an die Nachhaltigkeit von Gebäuden, sondern geben nur die zu untersuchenden Indikatoren sowie die Bewertungsmethoden vor. Auf Angaben zur Beurteilung des Bewertungsergebnisses oder eine Vorgabe von Benchmarks, Leistungsklassen o. ä. wird bewusst verzichtet. Eine solche Beurteilung kann auf nationaler Ebene bei der Nachhaltigkeitszertifizierung von Bauwerken erfolgen, liegt aber außerhalb des Anwendungsbereichs der in CEN/TC 350 entwickelten Normen.

In Zukunft sollen ergänzend zu den Normen für die Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden auch entsprechende europäische Regelungen für Ingenieurbauwerke entwickelt werden. Der VDZ wird diese Normungsaktivitäten begleiten.

Umweltproduktdeklaration von Zement

Zur Beurteilung der umweltbezogenen Nachhaltigkeit eines Bauwerks werden quantifizierte Umweltinformationen über die eingesetzten Bauprodukte benötigt. Das standardisierte Format, mit dem diese Informationen kommuniziert werden sollen, ist die so genannte Umweltproduktdeklaration (Environmental Product Declaration EPD). Die von CEN/TC 350 entwickelte Norm EN 15804 gibt Regeln für die Erstellung von EPDs vor. Ziel ist, dass die Produkthersteller verifizierbare und konsistente Daten zur Verfügung stellen, deren Ermittlung für alle Bauprodukte auf

vergleichbaren Regeln beruht. Zur Sicherstellung der Glaubwürdigkeit der in Umweltproduktdeklarationen kommunizierten Informationen werden diese durch unabhängige Dritte verifiziert.

Der VDZ hat auf Beschluss seines Vorstands eine EPD für einen Zement erstellt, dessen Zusammensetzung dem Mittelwert der 2010 in Deutschland hergestellten Zemente entspricht. Eine Datenabfrage in den deutschen Zementwerken war die Grundlage für die Ermittlung der Umweltwirkungen der Zementherstellung. 51 Werke, also fast alle deutschen Zement- und Mahlmwerke, stellten Informationen zu stofflichen und energetischen Ressourcen zur Verfügung, darüber hinaus wurden die Ergebnisse der gesetzlich vorgeschriebenen Emissionsmessungen an Drehofenanlagen ausgewertet. Die EPD für Zement umfasst als so genannte cradle-to-gate-EPD („von der Wiege bis zum Werkstor“) alle Umweltlasten der Produktherstellung inklusive der Lasten aus der Roh- und Brennstoffgewinnung/-verarbeitung sowie aus dem Transport der Roh- und Brennstoffe zum Zementwerk.

Nach ISO 14025 sind Umweltproduktdeklarationen in einem Umweltdeklarationsprogramm zu verwalten. Der Programmbetreiber muss über so genannte Produktkategorieeregeln die Transparenz und Vergleichbarkeit der in seinem Programm veröffentlichten EPDs gewährleisten. Darüber hinaus muss er ein geeignetes Verifizierungsverfahren durch unabhängige Prüfer einrichten. Das in Deutschland bekannteste EPD-Programm ist das des Instituts Bauen und Umwelt e. V. (IBU), dem der VDZ im Zusammenhang mit der Erarbeitung der Zement-EPD als Mitglied beigetreten ist.

Über viele Jahre war bei der Berechnung von Ökobilanzen für Zemente strittig, wie die Umweltlasten aus Nebenprodukten anderer Industrieprozesse rechnerisch zu berücksichtigen sind, wenn diese Stoffe bei der Zementherstellung eingesetzt werden. Bei der Umweltproduktdeklaration von Zement betrifft dies insbesondere Hochofenschlacke als Nebenprodukt des Hochofenprozesses sowie Steinkohleflugasche als Nebenprodukt der Elektrizitätserzeugung. Hier stellt sich die Frage, welcher Anteil der Lasten aus diesen Prozessen rechnerisch dem Hauptprodukt (beim Hochofenprozess dem Roheisen und beim Kohlekraftwerk der Elektrizität) und welcher dem Nebenprodukt zuzuweisen ist. Laut der neuen DIN EN 15804 ist in solchen Fällen eine so genannte „ökonomische Al-

lokation“ durchzuführen, das heißt, die Umweltlasten sind im Verhältnis des generierten Betriebseinkommens auf die Haupt- und Nebenprodukte zu verteilen. Für die Hochofenschlacke und die Steinkohleflugasche ergibt sich, dass auf sie nur ein sehr geringer Anteil von < 1 % der Umweltlasten des Hochofenprozesses bzw. der Elektrizitätsherstellung entfällt. Dies wurde bei der Berechnung der Umweltwirkungen der Zementherstellung in der EPD berücksichtigt.

Die Umweltproduktdeklaration für einen deutschen Durchschnittszement wurde im März 2012 veröffentlicht und ist über die Internetseiten des IBU und des VDZ verfügbar. **Tafel VI-5** zeigt eine Auswahl einiger in der EPD enthaltener Umweltinformationen.

Auf Basis der EPD für Zement wird nachfolgend durch den VDZ eine EPD für Betone verschiedener Festigkeitsklassen erarbeitet werden. Hierzu wird eine enge Abstimmung mit dem Bundesverband der deutschen Transportbetonindustrie (BTB) und der Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilbau (fdb) erfolgen.

Nachhaltigkeitszertifizierung in Deutschland

In einer zweijährigen kooperativen Zusammenarbeit des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) mit der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e. V. (DGNB) wurde ein System zur ganzheitlichen Betrachtung und Bewertung von Nachhaltigkeitsaspekten für Gebäude entwickelt, in der ökologische, ökonomische, soziale und technische Kriterien gleichwertig berücksichtigt werden. Hieraus entwickelten sich zwei separate Zertifizierungssysteme, das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB) sowie das Zertifizierungssystem der DGNB, nach dem inzwischen neben Büro- und Verwaltungsgebäuden auch z. B. Industriegebäude, Krankenhäuser oder Wohngebäude zertifiziert werden können. Je nach Ergebnis der Zertifizierung kann ein Siegel in Bronze, Silber oder Gold verliehen werden.

Der VDZ hat am Beispiel eines fiktiven Bürogebäudes mit Stahlbetontragwerk untersucht, welchen Einfluss die Umweltlasten der Zementherstellung auf das Ergebnis einer Nachhaltigkeitsbewertung im DGNB-System haben. Es zeigte sich, dass die Herstellung von Zement und Beton die Ökobilanz der Gebäudeherstellung maßgeblich beeinflusst. Die Umweltlasten der Gebäudenutzung (insbesondere aus der

Energiebereitstellung) sowie die Berücksichtigung ökonomischer, soziokultureller und technischer Kriterien führen aber dazu, dass die bei der Zementherstellung verursachten Umweltlasten letztlich nur einen sehr geringen Einfluss auf das Gesamtergebnis einer Nachhaltigkeitsbewertung nach dem DGNB-System haben. Technische Kriterien wie Brandschutz oder Schallschutz werden im DGNB-System z.T. höher bewertet als Indikatoren aus der Ökobilanzierung wie z.B. das Treibhauspotenzial.

Mess- und Prüfverfahren ■

Das Forschungsinstitut der Zementindustrie verfügt schon seit vielen Jahren über leistungsfähige Analysetechniken zur Bestimmung von Haupt-, Neben- und Spurenelementen. Ursprünglich wurden diese Techniken vor allem für Forschungsprojekte und zur Bearbeitung analytischer Fragestellungen eingesetzt. Heute ist das Institut immer stärker als Dienstleister für diese Analysenaufgaben gefragt. Der damit verbundene erhöhte Probendurchsatz erfordert Werkzeuge, die neben hoher Qualität auch eine schnelle Auftragsbearbeitung ermöglichen. Um dies zu gewährleisten, wird der Gerätepark des Forschungsinstituts ständig überprüft und ggf. erneuert oder erweitert.

Bestimmung des Kohlenstoff-, Wasserstoff-, Stickstoff- und Schwefelgehalts von Brennstoffen

Aufgrund des nach wie vor steigenden Einsatzes von Sekundärbrennstoffen in der Zementindustrie ist deren Analytik eines der Hauptaufgabengebiete der Abteilung Qualitätssicherung und Analytik des Forschungsinstituts. Um eine schnelle Bestimmung des Kohlenstoff-, Wasserstoff-, Stickstoff- und Schwefelgehalts von Brennstoffen zu ermöglichen, wurde im Jahr 2011 ein neues Elementaranalysegerät angeschafft, welches die simultane Bestimmung aller vier Elemente in wenigen Minuten gestattet.

Für die Bestimmung des biogenen Kohlenstoffanteils nach dem selektiven Löseverfahren sind außerdem eine hohe Anzahl von Kohlenstoffmessungen nötig. Trotz relativ inhomogener Proben werden bei Einwaagen von nur ca. 20 mg mit dem neuen Gerät niedrige Wiederholstandardabweichungen erreicht. Dies wurde z.B. durch positive Ergebnisse bei entsprechenden Ringversuchen belegt. Um die Qualität der Ergebnisse sicherzustellen, werden arbeitstäglich vor jeder Probenreihe zertifizierte Referenzmaterialien ver-

Tafel VI-5: Übersicht wichtiger Indikatoren zu Umweltauswirkungen und Ressourceneinsatz für die Herstellung einer Tonne deutschen Durchschnittszements

Parameter	Einheit	Wert
Globales Erwärmungspotenzial	kg CO ₂ äq.	691,7 ¹⁾
Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht	kg CFC11 äq.	1,50 · 10 ⁻⁵
Versauerungspotenzial von Boden und Wasser	kg SO ₂ äq.	0,83
Eutrophierungspotenzial	kg (PO ₄) ³⁻ äq.	0,12
Potenzial für die Bildung von troposphärischem Ozon	kg Ethen äq.	0,10
Potenzial für die Verknappung von abiotischen Ressourcen (Elemente)	kg Sb äq.	1,30 · 10 ⁻³
Potenzial für die Verknappung von abiotischen Ressourcen (fossile Brennstoffe)	MJ	1901,4
Gesamteinsatz nicht erneuerbarer Primärenergie	MJ	2451,3
Gesamteinsatz erneuerbarer Primärenergie	MJ	65,8

¹⁾ Hierin enthalten sind 98,1 kg CO₂ äq. aus der Verbrennung von Abfällen bei der Klinkerherstellung. Nach dem Verursacherprinzip (EN 15804) wären diese dem Produktsystem zuzuordnen, das den Abfall verursacht hat. Innerhalb der Zement-EPD wird jedoch von einer Subtraktion dieses Anteils abgesehen. So soll über Ländergrenzen hinweg die Vergleichbarkeit von berechneten Treibhauspotenzialen für Zemente auch dann sichergestellt werden, falls die bei der Klinkerherstellung eingesetzten Sekundärbrennstoffe in anderen Ländern keinen Abfallstatus haben sollten.

Bild VI-11:
Elementaranalysator für die Bestimmung von Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff und Schwefel



Bild VI-12:
Analysator für die Bestimmung des organischen Kohlenstoffs (TOC)



messen. Der Analysator ist langzeitstabil und muss nur einmal jährlich kalibriert werden (**Bild VI-11**).

Bestimmung von TOC in flüssigen und festen Proben

Das Probenaufkommen für die Bestimmung des organischen Kohlenstoffs (TOC) ist ebenfalls stetig angestiegen. Daher wurde auch ein neuer Analysator für die Bestimmung des TOC-Gehalts in flüssigen oder in festen Proben angeschafft (**Bild VI-12**). Die Bestimmung von Feststoffproben erfolgt hierbei nach DIN EN 13639 mit

einem vorherigen Salzsäureaufschluss. Bei Einwaagen von nur ca. 30 mg können hier Wiederholstandardabweichungen von weniger als 1 % relativ erzielt werden. Die Bestimmungsgrenze des Verfahrens liegt bei 0,01 M.-%.

Der Analysator ermöglicht außerdem die gleichzeitige Bestimmung des organischen und anorganischen Kohlenstoffs einer Probe, indem bis zu einer Temperatur von 500 °C zunächst der organische und bei weiterem Aufheizen auf 950 °C der anorganische Kohlenstoff bestimmt werden.

VII

Verantwortung für Mitarbeiter

143



Persönliche Betreuung von Teilnehmern eines Simulatortrainings mittels Simulex®

Arbeitssicherheit ■

Ergebnis der Sicherheitsarbeit

Die konstante Verbesserung der Arbeitssicherheit und des Gesundheitsschutzes in den Werken der Zementindustrie gehört zu den satzungsgemäßen Aufgaben des VDZ. Daher haben die Anstrengungen der Werke und des Forschungsinstituts der Zementindustrie einen hohen Stellenwert in der Gemeinschaftsarbeit. Der VDZ-Ausschuss Umwelt und Verfahrenstechnik, der in seiner Arbeit insbesondere durch den VDZ-Arbeitskreis Arbeitssicherheit in wirkungsvoller Weise unterstützt wird, entwickelt und leitet Maßnahmen zur Verbesserung der Arbeitssicherheit ein. Gemeinsames Ziel aller Bestrebungen ist es, sichere Arbeitsplätze und Arbeitsmittel bereitzustellen, aber auch 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 Unfallhäufigkeitsrate auf Basis meldepflichtiger Unfälle gemäß Definition der BG RCI in den deutschen Zementwerken seit 1969 auf weniger als ein Fünftel des ursprünglichen Wertes abgenommen hat. **Bild VII-1** zeigt den Verlauf der Unfallhäufigkeitsrate seit 1969. Im aktuellen Berichtszeitraum betrug der Wert etwa 8,1 bezogen auf Unfälle mit mehr als drei Ausfalltagen und etwa 12,9 bezogen auf Unfälle ab einem Ausfalltag.

Die wirtschaftliche Bedeutung der Arbeitssicherheit kann am besten durch die prozentuale Ausfallzeit gekennzeichnet werden, die sich durch die Arbeitsunfälle ergibt. Während 1969 durch meldepflichtige Betriebsunfälle eine mittlere relative Ausfallzeit von etwa 0,8 % entstand, lag dieser Wert 2011 nur noch bei 0,16 %.

Neben der Auswertung des Unfallgeschehens wurden in den vergangenen Jahren intensive Bemühungen zur Bereitstellung sicherer Arbeitsplätze und Arbeitsmittel unternommen. So erarbeitete der Arbeitskreis Arbeitssicherheit in verschiedenen Untergruppen eine Handlungsempfehlung zur Maschinenrichtlinie und eine umfangreiche Prüfmatrix zur Überprüfung von Arbeitsmitteln. Diese Maßnahmen werden von dem steten Bestreben begleitet, Mitarbeiter und Führungskräfte für das sichere

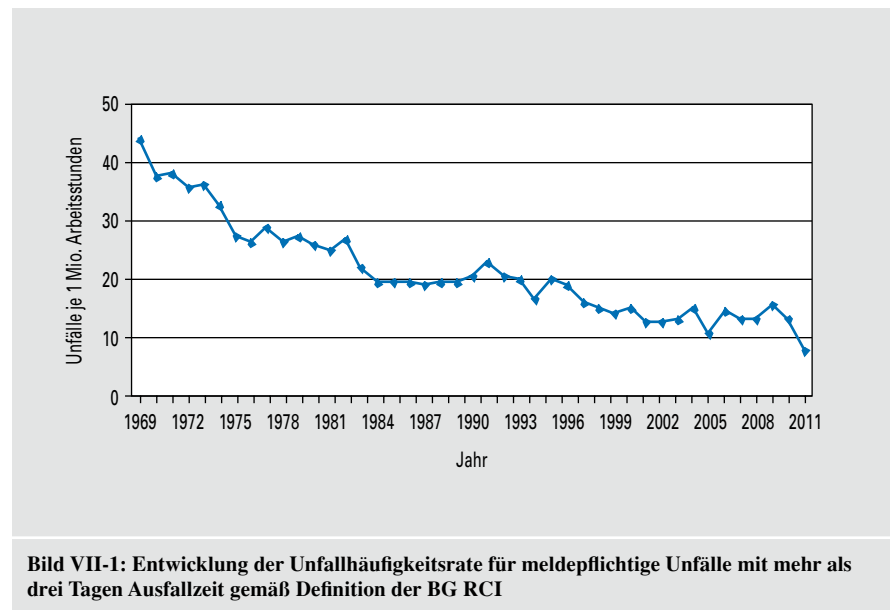


Bild VII-1: Entwicklung der Unfallhäufigkeitsrate für meldepflichtige Unfälle mit mehr als drei Tagen Ausfallzeit gemäß Definition der BG RCI

Tafel VII-1: Unfallkennzahlen für die Belegschaft im Betrieb der VDZ-Mitgliedswerke in den Jahren 2008 bis 2011

Jahr	2008	2009	2010	2011
Anzahl der erfassten Werke	47	47	46	44
Zementproduktion in Mio. t	33,6	30,4	29,9	33,5
Belegschaft im Betrieb				
Anzahl der Arbeitnehmer	4 975	5 063	5 081	5 093
Geleistete Arbeitsstunden	8 178 699	8 321 824	8 236 481	8 283 691
Produktionsbezogener Lohnstundenaufwand in h/t	0,24	0,27	0,28	0,25
Meldepflichtige Betriebsunfälle	109	132	111	67
Betriebsunfälle gesamt (einschließlich nicht meldepflichtiger Betriebsunfälle)	176	182	151	107
Unfallhäufigkeitsrate (Definition bis 2007/meldepflichtige Unfälle je 1 Mio. Arbeitsstunden)	13,3	15,9	13,5	8,1
Unfallhäufigkeitsrate (Definition ab 2008/gesamte Betriebsunfälle je 1 Mio. Arbeitsstunden)	21,5	21,9	18,3	12,9
Kalenderausfalltage durch Betriebsunfälle	3 363	3 262	2 806	1 668
Ausgefallene Arbeitstage je Arbeitnehmer	0,7	0,6	0,6	0,3
Kalenderausfalltage je Betriebsunfall	19,1	17,9	18,6	15,6
100-Mann-Quote (alte Definition/meldepflichtige Unfälle je 100 Arbeitnehmer)	2,2	2,6	2,2	1,3
100-Mann-Quote (neue Definition/gesamte Betriebsunfälle je 100 Arbeitnehmer)	3,5	3,6	3,0	2,1

Arbeiten zu sensibilisieren. Persönliches Verhalten und die Vermeidung negativer Routine sind entscheidende Kriterien für eine weitere, nachhaltige Reduktion der Unfallzahlen.

VDZ-Unfallstatistik

Seit 1965 werden die Zahlen der meldepflichtigen Betriebs- und Wegeunfälle in den deutschen Mitgliedswerken vom Forschungsinstitut der Zementindustrie jähr-

lich erfasst und statistisch ausgewertet. Die wichtigsten Ergebnisse und Kennzahlen der Unfallstatistiken aus den Jahren 2009 bis 2011 sind in **Tafel VII-1** zusammengestellt. Zudem sind zum Vergleich die Werte des Jahres 2008 aufgeführt. Um der Entwicklung der Personalstruktur in den Betrieben Rechnung zu tragen, bilden vom Jahr 1993 an nicht mehr die gewerblichen Arbeitnehmer, sondern die Gesamtbelegschaft im Betrieb die Grundlage für die Berechnung der Unfallstatistik. Seit 2008 gilt ein Werk zudem nur noch dann als unfallfrei, wenn es keine Ausfalltage als Folge eines Unfalls zu verzeichnen hat, d. h. auch keinen Arbeitszeitausfall durch nicht meldepflichtige Unfälle. Der Tag, an dem sich ein Unfall ereignet, wird dabei allerdings nicht mitgezählt. Unter den neuen Rahmenbedingungen für den Wettbewerb wird nun auch das maßgebliche Bewertungskriterium anders berechnet: Die Unfallhäufigkeitsrate beschreibt ab dem Berichtsjahr 2008 die Zahl aller Betriebsunfälle mit Ausfalltagen, bezogen auf eine Million geleisteter Arbeitsstunden.

Die Belegschaft im Betrieb ist seit 2008 geringfügig angestiegen (+2,4 %). Die Zahl der jährlich pro Arbeitnehmer geleisteten Arbeitsstunden lag im Jahr 2009 bei 1 644 h/a und stieg nach einem Rückgang auf 1 621 h/a in 2010 im Jahr 2011 wieder leicht auf 1 626 an. Aus **Tafel VII-1** geht hervor, dass die Produktion von ca. 30 Mio. t in den Jahren 2009 und 2010 auf 33,5 Mio. t im Jahr 2011 anstieg. Der produktionsbezogene Arbeitsstundenaufwand sank von 0,27 h/t auf 0,25 h/t. Die Zahl der meldepflichtigen Betriebsunfälle fiel von 132 im Jahr 2009 auf 67 ab. Auch die Gesamtzahl der Betriebsunfälle verringerte sich im Berichtszeitraum erfreulich: Während 2009 noch 182 Betriebsunfälle der Belegschaft im Betrieb registriert wurden, sank dieser Wert im Jahr 2010 auf 151 ab, 2011 auf 107. Dementsprechend hat sich auch die mittlere Unfallhäufigkeitsrate entwickelt.

Die durchschnittliche Zahl der pro Betriebsunfall verursachten Kalenderausfalltage lag im Berichtszeitraum zwischen 15,6 und 18,6. Die wirtschaftliche Bedeutung der Betriebsunfälle lässt sich auch mithilfe des Jahresleistungsausfalls beurteilen. Diese Kennzahl gibt die durch Betriebsunfälle verursachte Zahl der Kalenderausfalltage bezogen auf die Zahl der Mitarbeiter im Betrieb an. Der mittlere Jahresleistungsausfall hat von 0,6 in den Vorjahren auf 0,3 im Jahr 2011 abgenommen. Die 100-Mann-Quote, das ist die Zahl der Betriebsunfälle bezogen auf 100 Mitarbeiter im Betrieb,

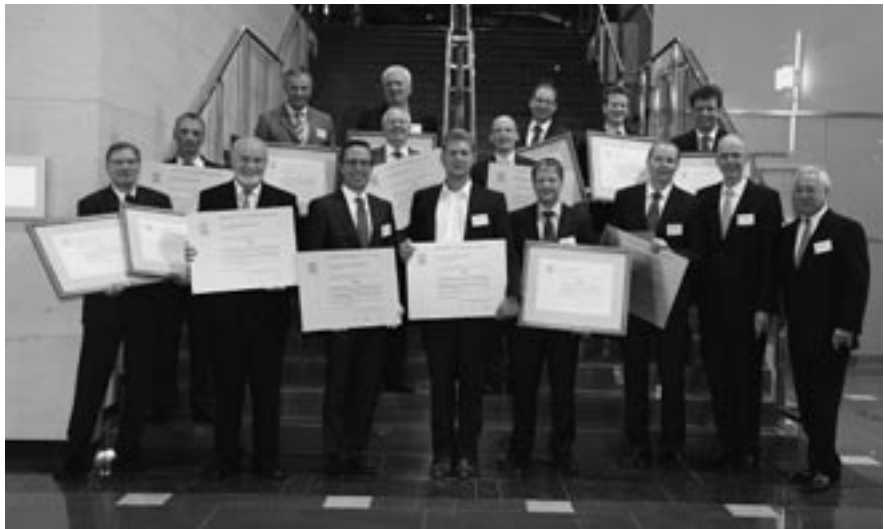


Bild VII-2: Auszeichnung der Sieger des Arbeitssicherheitswettbewerbs für das Jahr 2010 auf der Technisch-Wissenschaftlichen Zementtagung vom 27. bis zum 28.09.2011 in Düsseldorf

ist von 2009 nach 2011 weiter abgesunken. Auf Basis der neuen Definition (d. h. gesamte Betriebsunfälle je 100 Arbeitnehmer) fiel der Wert um ca. 42 % von 3,6 im Jahr 2009 auf 2,1 im Jahr 2011 ab. Zur besseren Vergleichbarkeit mit Vorjahreswerten wird in **Tafel VII-1** die 100-Mann-Quote gemäß der alten und der neuen Definition dargestellt.

Förderung der Arbeitssicherheit

In den vergangenen drei Jahren wurden neun Sicherheits-Merkblätter (Nr. 110 bis 118) mit den Beschreibungen typischer und besonders bemerkenswerter Betriebsunfälle sowie neun Sicherheits-Prüflisten (Nr. 90 bis 98) für die Überprüfung von Einrichtungen und Maßnahmen zur Verbesserung der Arbeitssicherheit in verschiedenen Betriebsbereichen herausgegeben. Zudem wurde 2011 eine Neuauflage des VDZ-Merkblatts Vt 12 „Sicheres Arbeiten beim Umgang mit Heißmehl“ fertiggestellt und im Januar 2012 veröffentlicht.

Bild VII-2 zeigt die Preisträger des VDZ-Arbeitssicherheitswettbewerbs für das Berichtsjahr 2010 nach der Verleihung der Tafeln im September 2011. Seit nunmehr 30 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 ist Ausdruck der Anerkennung aller 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. Für

das Jahr 2011 wurden 13 Klinkerwerke und 7 Mahlwerke für unfallfreie Arbeit ausgezeichnet. Aufgrund der unterschiedlichen Gefährdungslage werden Mahlwerke unabhängig von den Klinkerwerken in einem gesonderten Wettbewerb 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 Forschungsinstitut der Zementindustrie 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 in besonderem Maße die Führungskräfte im Betrieb, die Werksleiter, Betriebsleiter sowie die Meister und Vorarbeiter verantwortlich. Das vorbildliche Verhalten der Führungskräfte hat durch den ständigen Kontakt zu den Mitarbeitern den größten Einfluss auf die Verbesserung der Arbeitssicherheit im Betrieb. Diese Erkenntnis hat den VDZ veranlasst, auf Empfehlung des Arbeitskreises Arbeitssicherheit Intensivschulungen 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 dauern jeweils etwa

Tafel VII-2: Absolventenzahlen der Industriemeister-Lehrgänge

Lehrgang		Jahr	Zement	Kalk	Gesamt
Zement	1	1958/1959			
	bis	bis	229	45	274
	8	1964/1966			
Kalk/Zement	1	1965/1967			
	bis	bis	225	65	290
	11	1985/1987			
	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
	23	2007/2009	15	2	17
	24	2009/2011	18	1	19
Summe			248	44	292
Insgesamt			702	154	856

VDZ-Weiterbildungswerk ■

Industriemeister-Lehrgang

Die Qualifizierung und Weiterbildung der Mitarbeiter in den Mitgliedsunternehmen gehören zu den Kernaufgaben des VDZ. Die Zementhersteller machen davon seit jeher großen Gebrauch und legen gerade in Zeiten wirtschaftlicher Anspannung großen Wert auf gezielte Schulungsmaßnahmen. Das Angebot des VDZ richtet sich an unterschiedliche Zielgruppen. Dabei gewährleisten der Lehrgangsbeirat und der Austausch mit den Werken ein effizientes und praxisnahes Lernen mit modernen Inhalten. Der Industriemeister-Lehrgang stellt auch heute das zentrale Element des VDZ-Weiterbildungsangebots dar.

Seit nunmehr 53 Jahren führt der Verein Deutscher Zementwerke in Zusammenarbeit mit dem Bundesverband der deutschen Kalkindustrie e. V. die Meisterausbildung durch. In den Meisterlehrgängen konnten bisher insgesamt 856 Meister ausgebildet werden (s. **Tafel VII-2** und **Bild VII-3**). Der 24. Industriemeister-Lehrgang Kalk/Zement endete im März 2011. Die 19 Teilnehmer des Kurses, 18 aus der Zementindustrie und einer aus der Kalkindustrie, konnten ihren Meisterbrief in Empfang nehmen, nachdem sie zuvor ihr Können in acht schriftlichen und einer abschließenden mündlichen Prüfung vor dem Prüfungsausschuss der Industrie- und Handelskammer zu Düsseldorf unter Beweis gestellt hatten.

In insgesamt 28 Unterrichtsfächern mit knapp 1 000 Unterrichtsstunden müssen die Industriemeisteranwärter ihr theoretisches Rüstzeug für die spätere Tätigkeit im Zement- bzw. Kalkwerk erlernen. Während der 7-monatigen internatsartigen Unterbringung werden zunächst die Grundlagenfächer Mathematik, Physik, Chemie und stoffkundliche Grundlagen unterrichtet. Unterbrochen von zwei 4- und 6-monatigen Fernlehrgängen in den heimischen Werken werden sie anschließend schwerpunktmäßig in den fachspezifischen Fächern wie z. B. Gewinnungstechnik, Aufbereitungstechnik, Brenntechnik, Umwelttechnik, Maschinen- und Energietechnik geschult. Ein weiterer Schwerpunkt der Ausbildung liegt in den Fächern Arbeitssicherheit und Verhalten im Betrieb. So werden beispielsweise betriebstechnische Situationsaufgaben zu einzelnen Themen (z. B. Verhalten bei einem Unfall oder einer Auseinandersetzung unter Kollegen) ausgiebig bearbeitet und erläutert. Letztendlich wird die anerkannte Weiterbildungsmaßnahme durch den Erwerb der Ausbildereignung



Bild VII-3: Erfolgreiche Absolventen des 24. Industriemeister-Lehrgangs Kalk/Zement

zwei Tage und werden in Gruppen zu 15 bis 20 Teilnehmern außerhalb der Betriebe von Seminarleitern der BG RCI or-

ganisiert und durchgeführt. Die Seminare werden seit 1993 als Dauereinrichtung angeboten.

(AEVO) abgerundet. Nach dem Ablegen der Prüfung sind die Meister dann auch befähigt, Mitarbeiter auszubilden.

In der 18-monatigen Weiterbildungsmaßnahme erlernen die Teilnehmer nicht nur die theoretischen Grundlagen des Kalk- und Zementprozesses, sondern werden auch in fachübergreifenden Themen wie zum Beispiel in der Führung von und im Umgang mit Mitarbeitern gezielt geschult. Hierbei wird insbesondere darauf geachtet, dass die Schüler als Team funktionieren und sich gegenseitig unterstützen.

Der 25. Industriemeister-Lehrgang hat im Oktober 2011 mit 20 Teilnehmern begonnen.

Produktionssteuerer-Lehrgang

Die zunehmende Komplexität der verfahrenstechnischen Anlagen in Verbindung mit den hohen Anforderungen an die Umweltvorsorge sowie Arbeitssicherheit erfordern von den heutigen Leitstandsfahrern moderner Drehofenanlagen und Zementmühlen einen zunehmenden Kenntnisstand zum sicheren, umweltgerechten und energieeffizienten Betrieb der Anlagen. Um diesen gestiegenen Anforderungen an die Qualifikation von Leitstandsfahrern gerecht zu werden, führt der VDZ seit mehr als 20 Jahren die so genannten Produktionssteuerer-Lehrgänge sehr erfolgreich durch. Die Gesamtmaßnahme umfasst einen theoretischen Teil, der vom VDZ im Rahmen eines Internatsunterrichts in der Schulungsstätte Hilden angeboten wird, sowie einen praktischen Teil, der im Zementwerk zu absolvieren ist. Mit dem Ziel, dem Leitstandspersonal den aktuellen Kenntnisstand in der Verfahrens- und Umwelttechnik der Zementherstellung sowie die Anforderungen an einen effizienten, sicheren und störungsfreien Betrieb zu vermitteln, werden die Teilnehmer in der Schulungsstätte Hilden in drei Internatsabschnitten intensiv von erfahrenen Dozenten geschult. Den Teilnehmern wird in diesen insgesamt sieben Wochen der theoretischen Ausbildung ein vertieftes Verständnis in den Fächern Stoffkunde, Brenntechnik, Umwelttechnik, Aufbereitungstechnik, Mess- und Regelungstechnik sowie den Grundlagenfächern Mathematik, Chemie und Physik vermittelt. Vertieft werden die Kenntnisse durch die Schulung mit dem Simulator Simulex®. Dabei werden die Teilnehmer intensiv auf normale und ungeplante Betriebssituationen im Zementwerk vorbereitet. Angefangen vom Trainieren der Inbetriebnahme einzelner Aggregate und der gesamten Anlage bis hin zur Diagnose komplizierter Störungen wer-

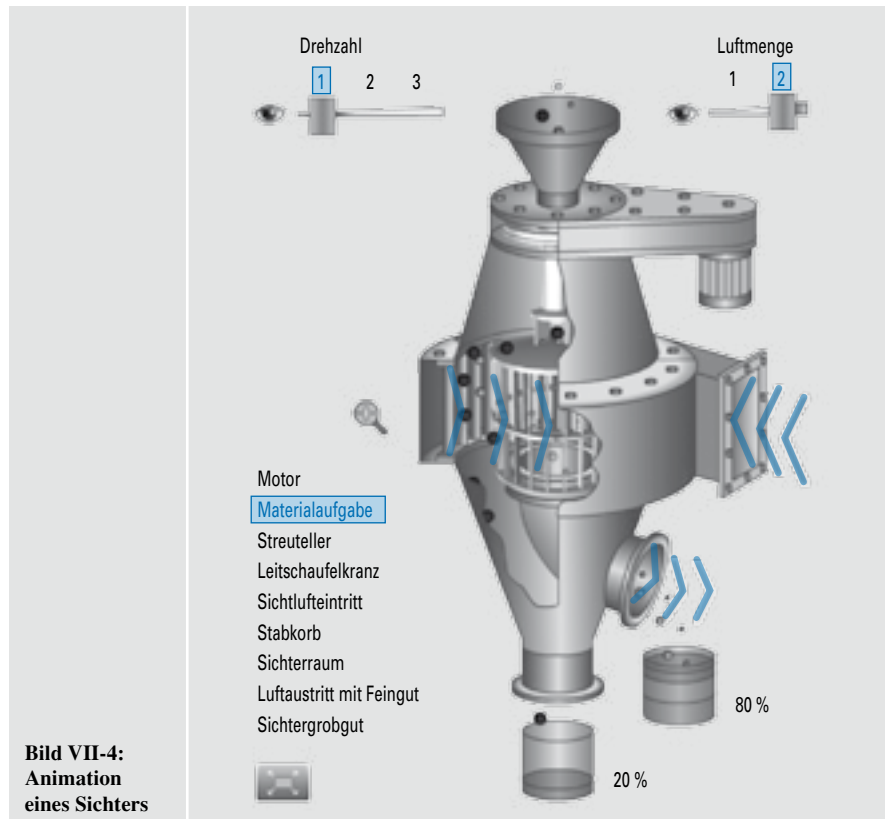


Bild VII-4:
Animation
eines Sickers

den die Schüler ausgiebig geschult. Neben den zahlreichen Unterrichtsstunden stehen aber auch der praktische Erfahrungsaustausch und das Arbeiten in der Gruppe im Vordergrund des Kurses.

Bis 2011 wurden in insgesamt 17 Lehrgängen mehr als 350 Personen zu Produktionssteuerern Zement weitergebildet. Nicht zuletzt die sehr guten Rahmenbedingungen, die die Schulungsstätte in Hilden bietet, haben zu der erfolgreichen Durchführung des Kurses beigetragen. Dozenten und Teilnehmer sind von den Lernbedingungen, der Unterbringung und der Vollverpflegung weiterhin sehr angetan.

Zementwissen 2.0 – multimediale Wissensvermittlung

Zwischen 1997 und 2008 wurden von Seiten des VDZ und der VDZ-Arbeitsgruppe Lehrbriefe insgesamt 47 Lernmaterialien zur Weiterbildung der gewerblich-technischen Mitarbeiter erstellt. Im Zuge der Weiterentwicklung der Lernmethoden wurden die so genannten Lehrbriefe im Rahmen des BMBF-Forschungsprojekts „Berufliche Bildung für Nachhaltige Entwicklung in der Deutschen Zementindustrie“ in webbasierte Onlinekurse überführt. Das Vorhaben wurde 2009 erfolgreich beendet. Mehr als 90 % der befragten Nutzer hatten sich zum Ende des Projekts für eine weitere Nutzung der VDZ-Lernplattform (www.elearning-vdz.de) ausgesprochen.

Insbesondere wurden von den befragten Nutzern die innovativen Visualisierungen und Animationen hervorgehoben, die den Lernenden dabei helfen, die behandelten Sachverhalte und Zusammenhänge besser zu verstehen (Bild VII-4). Durch Selbstkontrollfragen und computerbasierte Tests ist eine Überprüfung und Dokumentation des Lernerfolgs auf der Plattform ebenfalls möglich. Seit Anfang 2010 steht die VDZ-Lernplattform mit 48 Onlinekursen sowie 4 Informationsbriefen allen interessierten Betrieben zur Verfügung. Durch die verwendeten Technologien sind individuelle Zusammenstellungen von einzelnen Themen sowie werkspezifische Ergänzungen und Tests möglich. Ein Großteil der Kurse wurde darüber hinaus ins Englische übersetzt und kann so für internationale Schulungen besser genutzt werden. Eine russische Variante ist in Vorbereitung.

Seit März 2011 arbeitet der VDZ zusammen mit Partnern in dem BMBF-Verbundprojekt „Wissensnetzwerk Zement-Kalk-Beton“ an einer Erweiterung der Lernplattform hin zu einer branchenübergreifenden Plattform zum Wissens- und Informationsaustausch. Die Plattform soll bis März 2014 fertiggestellt und erprobt werden. Der Aufbau der Plattform sieht vor, dass die vier Anwendungsszenarien Informieren, Nachschlagen, Lernen und Netzwerken abdeckt werden. Neben der Zementindustrie werden weitere Bereiche der Baustoff-

Tafel VII-3: Seminarthemen 2012

Z-IML	Industriemeister Kalk / Zement
Z-PSL	Produktionssteuerer Zement
Z-GDP	Grundlagen der Zementproduktion und -verwendung
Z-IMP	Neues für Industriemeister und Produktionssteuerer
Z-INS	Instandhaltung im Zementwerk
Z-ASI	Praxiswissen Arbeitsschutz für Meister und Vorarbeiter aus der Zementindustrie
Z-FOB	Moderne Ofen- und Brenntechnik
Z-GMT	Grundlagen der Mahltechnik
Z-FMT	Mahltechnik für Fortgeschrittene
Z-GZC	Grundlagen der Zementchemie
Z-TMI	Technische Mineralogie
Q-QSI	Güteüberwachung nach DIN EN 196
Q-RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)
Q-HSÜ	Bestimmung des Hüttensandgehalts – Methodik
Q-HSM	Bestimmung des Hüttensandgehalts – Mikroskopisch-chemisches Verfahren
Q-INA	Interne Auditoren
U-EUT	Einführung in die Umwelttechnik (Grundlehrgang nach 5. BImSchV)
U-FIB	Fortbildungslehrgang für Immissionsschutzbeauftragte (Fortbildung nach 5. BImSchV)
B-MUP	Praxisseminar: Mahlbetrieb und Produkteigenschaften
E-AUT	Autorenkurs VDZ-Lernplattform
E-TUT	Tutorenkurs VDZ-Lernplattform

fe-Steine-Erden-Industrie eingebunden. Durch die Möglichkeit, an zentraler Stelle aktuelle Brancheninformationen zu erhalten, gezielt nach bestimmten Informationen, Personen und Interessengruppen zu suchen, gemeinsam mit anderen Wissen zu erarbeiten und sich zeitnah neues Wissen in Onlinekursen anzueignen, soll die Plattform für alle Personengruppen attraktiv sein und die Wissensarbeit in der Branche fördern. Damit stellt das Projekt eine sinnvolle Weiterentwicklung der VDZ-Lernplattform dar.

Weiterbildungsseminare

Seit 1998 bietet der VDZ im Rahmen seines Weiterbildungsangebots zusätzlich zu den durchgeführten Industriemeister- und Produktionssteuerer-Lehrgängen sowie den Arbeitssicherheitsseminaren eine Reihe von 1- und mehrtägigen Seminaren an. Neben Themen zur Verfahrenstechnik der Zementherstellung, chemischen Analytik, dem Immissions- und Umweltschutz, der Überwachung der Zementqualität sowie den Grundlagen der Betontechnologie und der Betonverarbeitung werden seit 2010 auch zwei Seminare zur VDZ-Lernplattform angeboten. Die vorgesehenen Seminare des VDZ sind im Wesentlichen als Einführung für junge sowie als Fortbildung für bereits länger in der Zementindustrie

tätige Mitarbeiter der VDZ-Mitgliedswerke gedacht. Darüber hinaus stehen die Seminare jedoch auch Mitarbeitern aus anderen Unternehmen und Branchen offen. Aufgrund der teilweise langfristigen Schulungsplanungen in den Unternehmen hat der VDZ seit 2010 sein bisheriges Angebot auf einen 2-jährigen Zeitraum ausgedehnt. Das aktuelle Kursangebot wurde den Mitgliedswerken sowohl in Form einer Broschüre als auch über das Internet unter www.vdz-online.de/weiterbildung bekannt gemacht. Über die Internetseite besteht zudem die Möglichkeit der Onlineanmeldung sowie des Bezugs eines Newsletters, der drei- bis viermal jährlich über die jeweils nächsten Seminare des VDZ informiert (Tafel VII-3).

Die Verfahrenstechnik der Zementherstellung wird in drei jährlich angebotenen Seminaren „Moderne Ofen- und Brenntechnik“, „Grundlagen der Mahltechnik“ und „Mahltechnik für Fortgeschrittene“ vermittelt. Die praxisbezogene berufliche Weiterbildung wird mit den 2012 erstmals angebotenen Seminaren „Instandhaltung im Zementwerk“ sowie „Neues für Industriemeister und Produktionssteuerer“ ausgebaut. Zielgruppe sind dabei insbesondere in der Praxis stehende Industriemeister und Produktionssteuerer.

Ziel des 4-tägigen Seminars „Grundlagen der Zementproduktion und -verwendung“ 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 Seminar wird alle zwei Jahre angeboten.

Jährlich finden die beiden 2-tägigen Seminare „Technische Mineralogie“ und „Grundlagen der Zementchemie“ statt. Im ersten Seminar 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 zweiten Seminar wird ein Überblick über die Grundlagen der Zementchemie und die Zusammenhänge zwischen Zementproduktion und Zementeigenschaften gegeben.

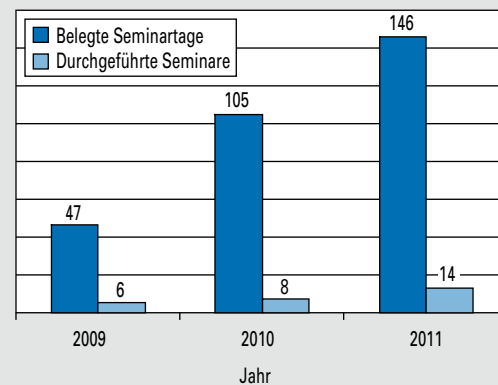
Immissionsschutzbeauftragte müssen gemäß der 5. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (5. BImSchV) mindestens alle zwei Jahre an Fortbildungsmaßnahmen teilnehmen. Während bei Grundlehrgängen für Immissionsschutzbeauftragte alle Bereiche des Umweltschutzes behandelt werden, können bei Fortbildungsveranstaltungen Schwerpunktthemen gewählt werden. Die Veranstaltungen werden im Abstand von zwei Jahren mit jeweils aktuellen Themen angeboten, die speziell auf die Belange der Zementindustrie zugeschnitten sind. Dabei stehen jeweils aktuelle Entwicklungen im deutschen und europäischen Umweltrecht, Emissionen von anorganischen und organischen Verbindungen und Spurenelementen und die Minderung der CO₂-Emissionen beim Klinkerbrennprozess im Mittelpunkt. Das Seminar ist als Fortbildungsmaßnahme im Sinne der 5. BImSchV durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen staatlich anerkannt.

Das Seminar „Einführung in die Umwelttechnik“ wird ebenfalls im Abstand von zwei Jahren abwechselnd mit dem vorgenannten Seminar durchgeführt. Im Seminar wird eine Einführung in alle Teilbereiche des Umweltschutzes und der Um-

welttechnik gegeben. Dabei wurden die Themen Umweltrecht, Emissionsmesstechnik, Minderung von Gas-, Staub- und Schwermetallemissionen sowie von Lärm und Erschütterungen, ökologische Verwertung von Abfällen und produktionsintelligenter Umweltschutz behandelt. Die Vorträge werden durch praktische Übungen zur Emissions- und Immissionsmesstechnik ergänzt. Das Seminar hat die staatliche Anerkennung als Grundlehrgang für zukünftige Immissionsschutzbeauftragte.

Zum Thema „Überwachung der Zementqualität“ werden jährlich vier Seminare angeboten. Zielgruppe dieser Seminare sind Laborleiter und verantwortliche Labormitarbeiter der Werke. Im 1-tägigen Seminar „Röntgenfluoreszenz (RFA)“ werden den Teilnehmern vertiefte Kenntnisse der RF-Analysentechnik vermittelt. Im 2-tägigen Seminar „Prüfungen nach DIN EN 196“ werden die in der Norm festgelegten physikalischen und chemischen Prüfungen an Zementen und zementartigen Bindemitteln bzw. an den Roh- und Ausgangsstoffen vorgestellt. Auf die Einhaltung einer normgerechten Arbeitsweise und die Ermittlung und Vermeidung von Fehlerquellen wird dabei besonderer Wert gelegt. Schwerpunkt eines weiteren 1-tägigen Seminars war die Bestimmung des Hüttensandgehalts in Zementen nach dem kombinierten mikroskopisch-chemischen Verfahren. Dieses Seminar wird durch ein 1-tägiges Seminar „Bestimmung des Hüttensandgehalts – methodischer Überblick“ ergänzt. Dabei wird den Teilnehmern ein Überblick über die

Bild VII-5:
Entwicklung
der belegten
Seminartage
in den Weiter-
bildungssemi-
naren des VDZ
seit 2009



möglichen Verfahren zur Bestimmung des Hüttensandgehalts in Zement vermittelt. Darüber hinaus wird nunmehr das Seminar „Interne Auditoren“ in das Programm aufgenommen. Das Seminar richtet sich an Mitarbeiter der Zementindustrie, die in ihren Unternehmen Energie-, Qualitäts- oder Umweltmanagementsysteme auditieren. Zum Abschluss erhalten die Teilnehmer ein Zertifikat „Interner Auditor nach ISO 19011“.

Auf dem Gebiet „Betontechnik“ wird zusätzlich das 1-tägige Praxisseminar „Mahlbetrieb und Produkteigenschaften“ angeboten. Dabei wird ein Überblick über den Einfluss des Betriebs von Zementmahl- und -mischanlagen auf wesentliche Zement- und Betoneigenschaften gegeben. Die komplexen Zusammenhänge zwischen der Zementherstellung und den granulomet-

rischen Eigenschaften von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen werden erläutert. Dabei besteht die Möglichkeit, aktuelle Fragestellungen aus der betrieblichen Praxis zu diskutieren.

Insgesamt wurden vom Forschungsinstitut der Zementindustrie seit 2009 im Schnitt 20 Seminare pro Jahr mit jeweils wechselnden Schwerpunkten angeboten. Zukünftig sind 23 Seminare vorgesehen. Insgesamt haben sich die Anzahl der durchgeführten Seminare sowie die Teilnehmerzahlen seit 2009 positiv entwickelt, wie das **Bild VII-5** verdeutlicht. Zusammen mit den konstanten bis steigenden Teilnehmerzahlen der Industriemeister- und Produktionssteuerer-Lehrgänge sowie der VDZ-Lernplattform ergibt sich ein insgesamt positives Bild der Weiterbildungsaktivitäten in der Zementindustrie.

Veröffentlichungen

Schriftenreihe der Zementindustrie

- Eickschen, E. *Wirkungsmechanismen Luftporen bildender Betonzusatzmittel und deren Nachaktivierungspotenzial.*
Düsseldorf: Verlag Bau + Technik, 2009 (Schriftenreihe der Zementindustrie 73)
- Bokern, J. *Betonprüfungen zur Beurteilung einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion: Auswirkungen der klimatischen Bedingungen auf die Übertragbarkeit von Prüfergebnissen.*
Düsseldorf: Verlag Bau + Technik, 2009 (Schriftenreihe der Zementindustrie 74)
- Seemann, S. *Einfluss des Mahlsystems und der Mahlatmosphäre auf die Zementeigenschaften.*
Düsseldorf: Verlag Bau + Technik, 2010 (Schriftenreihe der Zementindustrie 75)
- Tigges, V. E. *Die Hydratation von Hüttensanden und Möglichkeiten ihrer Beeinflussung zur Optimierung von Hochfenzementeigenschaften.*
Düsseldorf: Verlag Bau + Technik, 2010 (Schriftenreihe der Zementindustrie 76)
- Eppers, S. *Assessing the autogenous shrinkage cracking propensity of concrete by means of the restrained ring test.*
Düsseldorf: Verlag Bau + Technik, 2011 (Schriftenreihe der Zementindustrie 77)

Merkmale und Prüflisten

Sicherheits-Merkblätter

- Nr. 110 Verbrennung durch defekte Schläuche an Gasflaschen
- Nr. 111 Absturzunfall durch Defekt an einem Gabelstapler
- Nr. 112 Verbrennung durch einen Unfall mit Rostlöser-Spray
- Nr. 113 Beinahe-Unfall bei Feuerfest-Arbeiten am Ofenauslauf
- Nr. 114 Schwerer Unfall bei Transport mit Gabelstapler
- Nr. 115 Tödlicher Unfall bei Lkw-Entladung
- Nr. 116 Augenverletzung durch Staubablagerung
- Nr. 117 Unfall bei Demontage eines Ausmauerungsgeräts
- Nr. 118 Sturz mit dem Fahrrad auf Glatteis

Sicherheits-Prüflisten

- Nr. 90 Verwendung von Ausrüstung zum Autogen-Schweißen
- Nr. 91 Tätigkeiten auf mobilen Arbeitsbühnen
- Nr. 92 Tätigkeiten in Bereichen mit hoher Umgebungstemperatur
- Nr. 93 Feuerfest-Arbeiten
- Nr. 94 Arbeiten mit Flurförderzeugen
- Nr. 95 Abkippvorgänge mit Fahrzeugen
- Nr. 96 Persönliche Schutzausrüstung (PSA) zum Augenschutz
- Nr. 97 Geräte und Ausrüstungen für Bau- und Montagearbeiten
- Nr. 98 Fahrradfahren im Zementwerk

Verfahrenstechnische Merkblätter

- Vt 12 Sicheres Arbeiten beim Umgang mit Heißmehl (Neuaufg.)
- Vt 16 Feuerfeste Materialien

VDZ-Mitteilungen

Nr. 139 (Mai 2009) – 147 (Dezember 2011)

Jedes Jahr werden drei Ausgaben mit Erscheinungstermin in den Monaten Mai, September und Dezember publiziert.

Monitoring-Bericht

Verminderung der CO₂-Emissionen: Monitoring-Bericht 2008–2009; Beitrag der deutschen Zementindustrie.
Düsseldorf, 2010

Umweltdaten

Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2008.
Düsseldorf, 2009

Environmental Data of the Cement Industry 2008.
Düsseldorf, 2009

Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2009.
Düsseldorf, 2010

Environmental Data of the Cement Industry 2009.
Düsseldorf, 2010

Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2010.
Düsseldorf, 2011

Environmental Data of the Cement Industry 2010.
Düsseldorf, 2011

VDZ Bulletins (Cement International)

Hygiene, health and environmental protection: Admixtures with no relevant effect on the release of trace matters.
In: Cement International 9 (2011) 6, S. 20

The use of superplasticisers can be optimized still further: Cements containing granulated blastfurnace slag or limestone, and their interactions with PCE superplasticizers.
In: Cement International 9 (2011) 6, S. 21

Belite clusters in clinker caused by aluminium? Effects of raw materials and fuels on the clinker microstructure.
In: Cement International 9 (2011) 6, S. 22

From the VDZ learning platform to the Web 2.0 knowledge network: The learning platform is being extended to include new possible ways of co-operation, referencing and learning.
In: Cement International 9 (2011) 6, S. 23

Kongressband

Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (Hrsg): Process Technology of Cement Manufacturing: 6th International VDZ Congress (Düsseldorf 30.09.–02.10.2009).
Düsseldorf: Verlag Bau + Technik, 2009

Einzelveröffentlichungen

- Alonso, M. T.; Müller, C. *Leitfaden zur Herstellung von Zementestrichmörteln im Innenbereich.*
In: Forum Lafarge Zement (2010) 1, S. 8–9
- Alonso, M. T.; Müller, C. *Verwendung von CEM II- und CEM III/A-Zementen in zementgebundenen Estrichen.*
In: beton 59 (2009) 12, S. 595–601; 60 (2010) 1–2, S. 57–63
- Alonso, M. T.; Müller, C. *Verwendung von CEM II- und CEM III/A-Zementen in zementgebundenen Estrichen.*
In: Beton-Informationen 50 (2010) 6, S. 85–90
- Baetzner, S.; Glöckler, J.; Israel, D.; Paul, M. *Long-term effectiveness of tin (II) sulfate as a chromate reducer.*
In: Cement International 8 (2010) 5, S. 67–76
- Baetzner, S. *Chromium (VI) reduction of cement-containing preparations.*
In: Cement International 8 (2010) 3, S. 72–79
- Bauer, K.; Hoenig, V. *Energy efficiency of cement plants.*
In: Cement International 8 (2010) 3, S. 50–57
- Bluhm-Drenhaus, T.; Wirtz, S.; Scherer, V.; Schröter, K.; Perumalsamy, S.; Görner, K.; Aslan, Z.; Schäfer, S.; Hoenig, V. *Charakterisierung der inhomogenen Eigenschaften von Ersatzbrennstoffen für den Zementherstellungsprozess.*
In: VDI-Ges. Energietechn. (Hrsg.): 24. Deutscher Flammentag: Verbrennung und Feuerungen (Bochum 16.–17.09.2009). – Düsseldorf: VDI-Verlag, 2009 (VDI-Berichte 2056), S. 349–354
- Bluhm-Drenhaus, T.; Wirtz, S.; Scherer, V.; Perumalsamy, S.; Oeljeklaus, G.; Görner, K.; Aslan, Z.; Schäfer, S.; Hoenig, V. *CFD simulation of the co-incineration of solid recovered fuels in the pre-calciner.*
In: Cement International 9 (2011) 3, S. 54–63
- Bluhm-Drenhaus, T.; Wirtz, S.; Scherer, V.; Persumalsamy, S.; Oeljeklaus, G.; Görner, K.; Aslan, Z.; Schäfer, S.; Hoenig, V. *Modellierung der Flugstromverbrennung von Ersatzbrennstoffen für Calcinatoren der Zementindustrie.*
In: VDI Wissensforum (Hrsg.): 25. Deutscher Flammentag: Verbrennung und Feuerung (Karlsruhe 14.–15.09.2011). – Düsseldorf: VDI-Verlag, 2011 (VDI-Berichte 2119), S. 357–364
- Böhm, M.; Pierkes, R. *Evaluation of portland cement clinker with optical microscopy – case studies.*
In: 12th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials: Full Paper (Dortmund 15.–19.09.2009). – Dortmund: TU, 2009, 10 S.
- Böhm, M. *Evaluation of portland cement clinker with optical microscopy – case studies II.*
In: 12th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials (Ljubljana 14.–18.06.2012). – Ljubljana: Slovenian National Building and Civil Engineering Institute, 2011, 7 S.
- Borchers, I.; Müller, C. *Einfluss von Natrium und Kalium auf eine schädigende AKR in Abhängigkeit von der Gesteinskörnung.*
In: Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): 17. Internationale Baustofftagung: Tagungsbericht (Weimar 23.–26.09.2009). – Weimar, 2009, S. 2-0211–2-0216
- Borchers, I.; Müller, C. *Assessment of the alkali-reactivity potential of specific concrete mixtures to mitigate damaging ASR in concrete structures.*
In: Dehn, F.; Beushausen, H.: Performance-based specifications for concrete: Proceedings. Leipzig: MFPA, Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig, 2011, S. 98–106

- Breitenbücher, R.; Müller, C.
Fortschreibung der Betonnorm EN 206-1: Was ist zu erwarten?
In: Bundesverband Bauteile Deutschland, BDB (Hrsg.): Beton Bauteile 2010: Architektur, Ingenieurbau, Infrastruktur, Nachhaltigkeit, Regelwerke. Gütersloh: Bauverlag, 2009, S. 212–214
- Curbach, M.; Breitschaft, G.; Morgen, K.; Meyer, L.; Müller, C.; Naumann, J.
Eurocode 2 oder DIN 1045: Brauchen wir das Neue?
In: Beton- und Stahlbetonbau 105 (2010) 6, S. 340–341
- Ehrlich, N.; Mellwitz, R.; Rother, K.-H.
Erprobungsstrecke mit Hochofenzement CEM III/A.
In: Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): 17. Internationale Baustofftagung: Tagungsbericht (Weimar 23.–26.09.2009). – Weimar, 2009, S. 2-0071–2-0078
- Fleiger, P. M.; Woywadt, S.
Optimisation of the ball charge in mills for cement grinding.
In: Cement International 7 (2009) 6, S. 42–47
- Fleiger, P. M.; Woywadt, S.
Ball charge optimization of cement mills.
In: Powell, M. (Hrsg.): Comminution 2010: 7th International Comminution Symposium (Kapstadt 13.–16.04.2010). – Kapstadt, 2010, 12 S.
- Fleiger, P. M.; Schäfer, S.
Coaching the control room.
In: World Cement 42 (2011) 10, S. 94–99
- Fleiger, P. M.; Reichard, R.; Treiber, K.; Woywadt, S.
Enhancement of the grindability test according to Zeisel by a high-precision power measurement.
In: Kwade, A. (Hrsg.): 7th international symposium fine grinding and dispersing (Braunschweig 12.–13.10.2011). – Göttingen: Sierke, 2011, 12 S.
- Hauer, B.; Schäfer, S.; Koring, K.
Einsatz von Betonbrechsand in der Portlandzementklinkerherstellung.
In: Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): 17. Internationale Baustofftagung (Weimar 23.–26.09.2009). – Weimar, 2009, S. 2-1267–2-1272
- Koring, K.; Hoenig, V.
Einsatz der Oxyfuel-Technologie zur CO₂-Emissionsminderung von Drehofenanlagen der Zementindustrie: Prozessmodellierung zur Anpassung des Zementklinkerbrennprozesses an den Oxyfuel-Betrieb.
In: VDI-Ges. Energietechn. (Hrsg.): 24. Deutscher Flammentag: Verbrennung und Feuerungen (Bochum 16.–17.09.2009). – Düsseldorf: VDI-Verlag, 2009 (VDI-Berichte 2056), S. 331–336
- Laux, S.; Koring, K.; Hoenig, V.
Oxy-fuel combustion and CO₂ capture technology for cement kilns.
In: Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (Hrsg.): Process Technology of Cement Manufacturing: 6th International VDZ Congress 2009 (Düsseldorf 30.09.–02.10.2009). – Düsseldorf: Verlag Bau+Technik, 2009, S. 242–247
- Lindgard, J.; Nixon, P. J.; Borchers, I.; Schouenborg, B.; Wigum, B. J.; Haugen, M.; Akesson, U.
The EU “PARTNER” project – European standard tests to prevent alkali reactions in aggregates: final results and recommendations.
In: Cement and Concrete Research 40 (2010) 4, S. 611–635
- Lipus, K.; Baetzner, S.
Einfluss der Hüttensandchemie auf den Sulfatwiderstand.
In: Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): 17. Internationale Baustofftagung: Tagungsbericht (Weimar 23.–26.09.2009). – Weimar, 2009, S. 2-0311–2-0316
- Meer, R. van der; Oerter, M.
¹⁴C-method for biomass determination and its potential to be applied at stacks.
In: Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (Hrsg.): Process Technology of Cement Manufacturing: 6th International VDZ Congress 2009 (Düsseldorf 30.09.–02.10.2009). – Düsseldorf: Verlag Bau+Technik, 2009, S. 249–250
- Middel, M. M.; Müller, C.; Müller, E.
Zementestriche: beständig, ästhetisch, nachhaltig.
In: Beton-Informationen 50 (2010) 6, S. 83–84

- Müller, C. *Further amendments to the EN 206-1 concrete standard: A comparison of national application rules across Europe.*
In: Bundesverband Deutsche Beton- und Fertigteilindustrie, BDB (Hrsg.): 53. BetonTage: Concrete Solutions (Neu-Ulm 10.–12.02.2009). – Gütersloh: Bauverlag, 2009, S. 156–158
- Müller, C.; Severins, K.; Hauer, B. *Neue Erkenntnisse zur Leistungsfähigkeit von Zementen mit den Hauptbestandteilen Kalkstein, Hüttensand und Flugasche.*
In: beton 59 (2009) 10, S. 469–478; 11, S. 531–537; Cement International 8 (2010) 3, S. 80–86; 4, S. 82–93
- Müller, C. *Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen im Betonbau: Nachhaltige Lösungen für das Bauen mit Beton.*
In: Beton- und Stahlbetonbau 104 (2009) 2, S. 105–112
- Müller, C.; Borchers, I.; Stark, J.; Seyfarth, K.; Giebson, C. *Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Betonzusammensetzungen – Vergleich von Performance-Prüfverfahren.*
In: Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): 17. Internationale Baustofftagung: Tagungsbericht (Weimar 23.–26.09.2009). – Weimar, 2009, S. 2-0261–2-0266
- Müller, C.; Severins, K. *Umweltschonend, dauerhaft, leistungsfähig: CEM II- und CEM III/A-Zemente setzen sich mit ihren vielen Vorteilen im Betonbau immer mehr durch.*
In: Deutsches Ingenieurblatt (2009) 1–2, S. 26–30
- Müller, C.; Severins, K. *ÖkotopZement: ökologisch und technisch optimierte Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen.*
In: Mahammadzadeh, M.; Biebeler, H.; Bardt, H. (Hrsg.): Klimaschutz und Anpassung an die Klimafolgen: Strategien, Maßnahmen und Anwendungsbeispiele. Köln: Institut der deutschen Wirtschaft Köln Medien GmbH, 2009, S. 68–74
- Müller, C.; Severins, K. *Möglichkeiten und Grenzen in der Anwendung von Zementen mit den Hauptbestandteilen Kalkstein, Hüttensand und Flugasche.*
In: Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): 17. Internationale Baustofftagung: Tagungsbericht (Weimar 23.–26.09.2009). – Weimar, 2009, S. 2-0365–2-0370
- Müller, C. *Performance of cements with several main constituents (blended cements).*
In: Cement and Building Materials Review (2010) 41, S. 30–41
- Müller, C. *Results of the laboratory freeze-thaw tests and their transferability to practical conditions.*
In: Bager, D. H. (Hrsg.), Freeze-thaw testing of concrete: Input to revision of CEN test methods. Workshop proceedings from a Nordic miniseminar. – Oslo: Nordic Concrete Federation, 2010 (Nordic Concrete Federation: Workshop Proceedings 9), S. 91–108
- Müller, C. *Leistungsfähigkeit von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen.*
In: BWI Betonwerk International (2010) 6, S. 46–55; CPI Concrete Plant International (2010) 6, S. 40–49
- Müller, C.; Palecki, S.; Möser, B.; Franke, L. *Durability of ultra-high performance concrete (UHPC).*
In: Fédération Internat. du Béton, fib (u.a.) (Hrsg.): The Third International fib Congress and Exhibition incorporating the PCI Annual Convention & Bridge Conference: Think globally, build locally (Washington, D.C. 29.05.–02.06.2010). – Washington: Fédération Internat. du Béton, fib, 2010, 14 S.
- Müller, C.; Severins, K. *Possibilities and limitations regarding the application of cements with the main constituents limestone, granulated blastfurnace slag and fly ash.*
In: Fédération Internat. du Béton, fib (u.a.) (Hrsg.): The Third International fib Congress and Exhibition incorporating the PCI Annual Convention & Bridge Conference: Think globally, build locally (Washington, D.C. 29.05.–02.06.2010). – Washington: Fédération Internat. du Béton, fib, 2010, 12 S.

- Müller, C. *Vertrauen ist gut....: ...Kontrolle ist besser.*
In: Bauwerk (2010) 13, S.10–11
- Müller, C.; Palm, S. *Cement grades with a low portland cement clinker ratio for the concretes of the future: Zemente mit geringem Portlandzementklinkeranteil für die Betone der Zukunft.*
In: Bundesverband Deutsche Beton- und Fertigteilindustrie, BDB (Hrsg): 55. BetonTage, Kongressunterlagen: Nachhaltige Innovationen. – Gütersloh: Bauverlag, 2011, S. 86–89
- Müller, C.; Borchers, I. *Alkali-Kieselsäure-Reaktion.*
In: Institut für Bauforschung, IBAC; BetonMarketing West; RWTH Aachen (Hrsg): 41. Aachener Baustofftag: Betonkorrosion, ein ungeliebtes Thema ... und doch so wichtig (Aachen 15. März 2011). – Aachen: Institut für Bauforschung, IBAC, 2011, getr. Zählung
- Müller, C.; Borchers, I. *AKR: Nur Problem oder auch Lösungen?*
In: Oesterheld, R. (Hrsg): 3. Betonfachtagung Nord: Das Bauen mit Beton aus dem Blickwinkel der Dauerhaftigkeit und neuer Regelwerke (Braunschweig 29.–30.09.2011). – Düsseldorf: Verlag Bau+Technik, 2011, S.161–173
- Müller, C.; Severins, K. *Ökologisch und technisch optimierte Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen.*
In: Gesellschaft deutscher Chemiker: Wochenschau (2011) 14
- Müller, C.; Schäffel, P. *Lösender Betonangriff.*
In: Müller, H. S.; Nolting, U.; Haist, M. (Hrsg): Schutz und Widerstand durch Betonbauwerke bei chemischem Angriff : 8. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 17. März 2011. – Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2011, S. 19–28
- Müller, H. S.; Burkart, I.; Budelmann, H.; Ewert, J.; Mechtcherine, V.; Dudziak, L.; Müller, C.; Eppers, S. *Time-dependent behaviour of ultra high performance concrete (UHPC).*
In: Fédération Internat. du Béton, fib (u.a.) (Hrsg): The Third International fib Congress and Exhibition incorporating the PCI Annual Convention & Bridge Conference: Think globally, build locally (Washington, D.C. 29.05.–02.06.2010). – Washington: Fédération Internat. du Béton, fib, 2010, 15 S.
- Nebel, H.; Spanka, G. *Validation of a European leaching test for construction products.*
In: Cement International 9 (2011) 6, S. 52–65
- Oerter, M.; Zunzer, U. *Kontinuierliche Messung von Quecksilberemissionen bei der Zementherstellung.*
In: Verein Deutscher Ingenieure, VDI; Deutsches Institut für Normung, DIN (Hrsg): Emissionsminderung 2010: Stand, Konzepte, Fortschritte. Tagung mit begleitender Fachausstellung. – Düsseldorf: VDI-Verlag, 2010 (VDI-Berichte 2110), S. 221–224
- Oerter, M.; Schäfer, S. *Monitoring of mercury and its behaviour in the clinker burning process.*
In: Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (Hrsg): Process Technology of Cement Manufacturing : 6th International VDZ Congress 2009 (Düsseldorf 30.09.–02.10.2009). – Düsseldorf: Verlag Bau+Technik, 2009, S. 232–233
- Oerter, M. *Möglichkeiten und Grenzen des EBS-Einsatzes in Zementwerken: Auswirkungen auf fossile CO₂-Emissionen.*
In: Bilitewski, B.; Faulstich, M.; Urban, A. (Hrsg.): Tagungsband zur 15. Fachtagung Thermische Abfallbehandlung (Dresden 09.–10.03.2010). – Pirna: Forum für Abfallwirtschaft u. Altlasten, 2010 (Beiträge zur Abfallwirtschaft/Altlasten 65), S. 189–194
- Oerter, M.; Schneider, M. *The use of alternative fuels in the German cement industry: an ecological and economical success story.*
In: Cement and Building Materials Review (2010) 39, S. 44–48

- Oerter, M. *Aktuelle Situation und zukünftige Perspektiven der Abfallmitverbrennung in der Zementindustrie.*
In: Bildungszentrum für die Entsorgungs- und Wasserwirtschaft GmbH, BEW, 2011
- Theben, M. *Neuere Entwicklungen bei der Abfallverbrennung und -mitverbrennung.*
In: Bildungszentrum für die Entsorgungs- und Wasserwirtschaft GmbH, BEW, 2011
- Pierkes, R.; Rickert, J. *Auswirkung von Sanden auf die Bewertung potenziell alkalireaktiver Gesteinskörnungen: Effect of sand on the evaluation of potentially alkali-reactive aggregates.*
In: beton 61 (2011) 9, S. 365–371
- Reiners, J. *Einfluss der Umweltwirkungen der Zementherstellung auf die Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden.*
In: Forum: Kundenmagazin von Lafarge Zement (2011) 2, S. 26–29
- Rickert, J. *Zement und Fließmittel: Gemeinsam für robuste Betone.*
In: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein, DBV (Hrsg): DBV-Regionaltagung Hamburg-Bergedorf 2009. – Wiesbaden: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein, DBV, 2009, 3 S.
- Rickert, J. *Einfluss von Fließmitteln auf das Zeta-Potential und die Rheologie von Zementleimen.*
In: Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg): 17. Internationale Baustofftagung: Tagungsbericht (Weimar 23.–26.09.2009). – Weimar, 2009, S. 1-0341–1-0346
- Rickert, J. *Fair-faced concrete: possible causes for discolorations.*
In: Fédération Internat. du Béton, fib (u.a.) (Hrsg): The Third International fib Congress and Exhibition incorporating the PCI Annual Convention & Bridge Conference: Think globally, build locally (Washington, D.C. 29.05.–02.06.2010). – Washington: Fédération Internat. du Béton, fib, 2010, 18 S.
- Rickert, J. *Discolorations of fair faced concrete: Influence of sedimentation.*
In: Lohaus, L.; Oesterheld, R. (Hrsg): 2. Betonfachtagung Nord – Sichtbeton. – Hannover: Universität Hannover: Institut für Baustoffe; BetonMarketing Nord, 2010 (Berichte aus dem Institut für Baustoffe, Sonderheft), S. 39–53
- Rickert, J. *Zeta-Potential und Rheologie von Zementleimen – Einfluss von Fließmittel sowie Hüttensand und Kalkstein.*
In: beton 60 (2010) 7–8, S. 315–320; 9, S. 363–365
- Rickert, J.; Herrmann, J. *Interactions between granulated blastfurnace slag or limestone as cement main constituent and super-pasticisers based on polycarboxylate ether.*
In: Palomo, A.; Zaragoza, A.; López Agüí, J. C. (Hrsg): 13th International Congress on the Chemistry of Cement, ICCC: Cementing a sustainable future (Madrid 03.–08.07.2011). Abstracts and Proceedings. – Madrid 2011, 7 S.
- Schäfer, S.; Hoenig, V. *Criteria for the selection of precalciner kilns.*
In: Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (Hrsg): Process Technology of Cement Manufacturing: 6th International VDZ Congress 2009 (Düsseldorf 30.09.–02.10.2009). – Düsseldorf: Verlag Bau+Technik, 2009, S. 194–199
- Schäfer, S.; Thormann, J. *Environmentally friendly mining of raw materials.*
In: Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (Hrsg): Process Technology of Cement Manufacturing: 6th International VDZ Congress 2009 (Düsseldorf 30.09.–02.10.2009). – Düsseldorf: Verlag Bau+Technik, 2009, S. 114–117

- Schäffel, P.; Rickert, J. *Einfluss schwindreduzierender Zusatzmittel auf das autogene Schwinden und weitere Eigenschaften von Zementstein.*
In: Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): 17. Internationale Baustofftagung: Tagungsbericht (Weimar 23.–26.09.2009). – Weimar, 2009, S. 1-0347–1-0352
- Schäffel, P. *A qualitative model for the action of shrinkage-reducing admixtures in hardened cement paste.*
In: Fédération Internat. du Béton, fib (u.a.) (Hrsg.): The Third International fib Congress and Exhibition incorporating the PCI Annual Convention & Bridge Conference: Think globally, build locally (Washington, D.C. 29.05.–02.06.2010). – Washington: Fédération Internat. du Béton, fib, 2010, 18 S.
- Schäffel, P. *Wirkungsweise von Schwindreduzierern.*
In: HeidelbergCement (Hrsg.): 4. HeidelbergCement Bauchemie-Tage (Münster 15.–16.04.2010). – Münster, 2010
- Schneider, M. *VDZ i zementnaja promischlennost germanii.*
In: Zement i ego primeneniye (2009) 1–2, S. 2–4
- Schneider, M. *Market situation regarding the future of concrete: Global indicators, technical developments and cost trends – the market for cement.*
In: Bundesverband Deutsche Beton- und Fertigteilindustrie, BDB; Fachverband Beton- und Fertigteilwerke Baden-Württemberg (Hrsg.): 53. BetonTage: Concrete Solutions (Neu-Ulm 10.–12.02.2009). – Gütersloh: Bauverlag, 2009, S. 74–75
- Schneider, M. *New cement technologies*
In: Global Cement Magazine (2011) 3, S. 28–30
- Schneider, M.; Romer, M.; Tschudin, M.; Bolio, H. *Sustainable cement production – present and future.*
In: Cement and Concrete Research 41 (2011) 7, S. 642–650
- Schulze, S.; Rickert, J. *Influences of the chemical composition of fly ashes on their reactivity.*
In: Palomo, A.; Zaragoza, A.; López Agüí, J. C. (Hrsg.): 13th International Congress on the Chemistry of Cement, ICCC: Cementing a sustainable future (Madrid 03.–08.07.2011). Abstracts and Proceedings. – Madrid, 2011, 7 S.
- Stephan, D.; Dikoundou, S. N.; Raudaschl-Sieber, G. *Influence of combined doping of tricalcium silicate with MgO, Al₂O₃ and Fe₂O₃: Synthesis, grindability, X-ray diffraction and ²⁹SiNMR.*
In: Materials and Structures/Materiaux et Constructions 41 (2008) 10, S. 1729–1740
- Thomas, L.; Schäfer, S. *Use of internet-assisted teaching and learning methods in the cement industry: Conception and initial experience of the VDZ.*
In: Cement International 7 (2009) 6, S. 58–67
- Woywadt, S.; Fleiger, P. M. *Optimisation of the ball charge from mills for cement grinding.*
In: Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (Hrsg.): Process Technology of Cement Manufacturing: 6th International VDZ Congress 2009 (Düsseldorf 30.09.–02.10.2009). – Düsseldorf: Verlag Bau+Technik, 2009, S. 140–145

Einzelveröffentlichungen (Monographien):

- Berger, H.; Hoenig, V. *Energieeffizienz der österreichischen Zementindustrie.*
Wien: Vereinigung der Österreichischen Zementfabrikanten, VÖZ, 2010
- BetonMarketing Deutschland (Hrsg.) *Alkali-Kieselsäure-Reaktion: Erfahrungen aus der Praxis und aktuelle Regelwerke.*
Düsseldorf: Verlag Bau+Technik, 2010

- Breitenbücher, R.; Sievering, C.; Schiefl, P.; Wenzl, P.; Stark, J.; Seyfarth, K.; Siebel, E.; Müller, C.; Eickschen, E.; Böhm, M.
Rissbildung an Fahrbahndecken aus Beton: Auswirkungen von Alkali-Kieselsäure-Reaktionen (AKR). Phase I. In-situ-Untersuchungen an Fahrbahndecken aus Beton mit/ohne Risse.
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 1042, Bremerhaven: Wirtschaftsverlag N.W., 2010
- Bundesverband Estrich und Belag, BEB; Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (Hrsg.)
Leitfaden zur Herstellung von Zementestrichmörteln im Innenbereich: Stand Mai 2009.
Troisdorf: Bundesverband Estrich und Belag, BEB, 2009
- Grigiz, R.
Experimentelle Bestimmung von Materialparametern für die Beschreibung der Prallzerkleinerung in Kugelmøhlen.
In: Diplomarbeit, Hochschule Niederrhein Krefeld 2010
- Hauer, B.; Pierkes, R.; Schäfer, S.; Seidel, M.; Herbst, T.; Rübner, K.; Meng, B.
Verbundforschungsvorhaben „Nachhaltig Bauen mit Beton“: Potenziale des Sekundärstoffesatzes im Betonbau – Teilprojekt B.
DAfStb: Schriftenreihe 584, Berlin: Beuth, 2011
- Lindgard, J.; Andiç-Çakir, Ö.; Borchers, I.; Broekmans, M.; Brouard, E.; Fernandes, I.; Giebson, C.; Lindgård, J.; Pedersen, B.; Pierre, C.; Rønning, T. F.; Thomas, M.; Wigum, B. J.
Literature survey on performance testing: RILEM TC219-ACS-P.
COIN Project Report 27, Oslo: SINTEF Building and Infrastructure, 2011
- Müller, C.; Eickschen, E.; Pierkes, R.
Untersuchungen zur Verzögerung des Schadensfortschritts bei AKR-geschädigten Fahrbahndecken aus Beton.
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 1038, Bonn: Wirtschaftsverlag N.W., 2010
- Rickert, J.; Spanka, G.; Nebel, H.
Harmonisierung von Prüfmethoden für den Vollzug der EG-Bauprodukten-Richtlinie: Validierung eines europäischen Auslaugtests für Bauprodukte. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, BMU Forschungskennzahl 370995303UBA-FB 001487.
Umweltbundesamt, UBA, 2011
- Schäffel, P.
Zum Einfluss schwindreduzierender Zusatzmittel und Wirkstoffe auf das autogene Schwinden und weitere Eigenschaften von Zementstein.
Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar 2009
- Sloot, H.A. van der ; Zomeren, A. van.; Stenger, R.; Meeussen, J. C. L.; Hoede, D.; Rietra, R. P.; Stenger, R.; Lang, Th.; Schneider, Martin; Spanka, G.; Stoltenberg-Hansson, E.; Dath, P.; Lerat, A.
Environmental CRITERIA for CEMENT based products: ECRICEM Phase I: Ordinary portland cements; Phase II: Blended Cements and methodology for impact assessment. Energy research Centre of the Netherlands, ECN, ECN-E-11-020.
Petten, 2011
- Treiber, K.
Erweiterung der Mahlbarkeitsprüfung nach Zeisel um eine hochauflösende Leistungsbestimmung.
Bachelorthesis, FH Düsseldorf 2010



VDZ gGmbH
Postfach 30 10 63
D-40410 Düsseldorf
Tannenstraße 2
D-40476 Düsseldorf